

**Onderzoek naar de oorzaak en  
oplossing voor witte *Beggiatoa*  
matten op de bodem van het  
Grevelingenmeer**





**Onderzoek naar de oorzaak en  
oplossing voor witte *Beggiatoa* matten  
op de bodem van het Grevelingenmeer**

**Overzicht van feiten en hypotheses ten  
behoefte van de MIRT Grevelingen**

drs. A.J. Nolte  
dr. L.V. Basch

1201650-000



## Titel

Onderzoek naar de oorzaak en oplossing voor witte *Beggiatoa* matten op de bodem van het Grevelingenmeer

<b>Opdrachtgever</b>	<b>Project</b>	<b>Kenmerk</b>	<b>Pagina's</b>
Natuur- en Recreatieschap de Grevelingen	1201650-000	1201650-000-ZKS-0038	29

## Trefwoorden

Grevelingenmeer, Bodemleven, *Beggiatoa*, Zuurstof, Getij

## Samenvatting

De witte matten die op de bodem van het Grevelingenmeer worden aangetroffen, worden veroorzaakt door de *Beggiatoa* bacterie. Deze bacterie komt op het grensvlak van sulfide (uit de bodem) en zuurstof (uit de waterkolom) voor. Het voorkomen en de steeds verdere verspreiding van de witte matten wordt toegeschreven aan ophoping van organisch materiaal en zuurstofarme condities die als gevolg van zout- en/of temperatuurstratificatie en de geringe dynamiek van het Grevelingenmeer aanwezig zijn. Omdat objectieve monitoring ontbreekt, ligt slechts anekdotisch bewijs aan deze hypothese ten grondslag. Er ontbreekt daardoor een essentiële schakel tussen herintroductie van getij als effectieve maatregel om de zuurstofconcentratie te verbeteren en een oplossing voor de 'witte matten'.

Dit rapport vat monitoringsgegevens uit vier bronnen samen die alle relevante informatie bevatten, maar die nog niet eerder met elkaar in verband zijn gebracht. Mede op basis van deze samenvoeging worden (onder andere) de volgende twee vragen beantwoord:

- 1 Wat is de (meest waarschijnlijke) verklaring voor het steeds meer voorkomen van de witte matten?
- 2 Wat gebeurt er met de witte matten als een beperkt getij is geïntroduceerd?

Geconcludeerd wordt dat de frequent terugkerende zuurstofarme periodes ervoor zorgen dat het bodemleven geen kans krijgt om zich volledig te herstellen, als het eenmaal door een zuurstofarme periode is verdwenen. Na een zuurstofarme periode vindt juist wel snel kolonisatie door *Beggiatoa* plaats. Een vertragend effect treedt mogelijk op doordat bodemleven moeilijker terugkeert in een door *Beggiatoa* zuurstofloos geworden sediment. Het is mogelijk dat de afwezigheid van bodemdieren de aanwezigheid van *Beggiatoa* juist versterkt, omdat bioturbatie van de bodem ontbreekt. Voor de ophoping van organisch materiaal is geen aanwijzing gevonden en deze lijkt dan ook hooguit van secundair belang.

Indien deze hypothese juist is, is het verhinderen van zuurstofarme periodes een geschikte maatregel om het bodemleven in het Grevelingenmeer te verbeteren en is herintroductie van getij een geschikte maatregel voor het realiseren van een gezond bodemleven. Aanbevolen wordt om de hypothese in het veld en het laboratorium te toetsen.

## Referenties

–

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
def	dec. 2011	drs. A.J. Nolte		ir. J.G.C. Smits		ir. T. Schilperoort	
		dr L.V. Basch					

## Status

definitief



## Inhoud

<b>1</b>	<b>Introductie</b>	<b>1</b>
1.1	Inleiding	1
1.2	Geen schimmel maar een bacterie	1
1.3	Vraagstelling en aanpak	2
<b>2</b>	<b>Overzicht van gegevens</b>	<b>3</b>
2.1	Literatuuronderzoek: Basis biologie en ecologische relaties van <i>Beggiatoa</i>	3
2.2	Verspreiding van <i>Beggiatoa</i> en schade aan bodemleven	5
2.3	Sedimentsamenstelling	9
2.4	Zuurstofconcentratie en stratificatie in de waterkolom (GTSO)	12
2.5	Benthische fauna (BIOMON)	12
2.5.1	Overzicht van gegevens	12
2.5.2	Wat kan worden geconcludeerd uit trends in de benthische fauna?	19
<b>3</b>	<b>Hypothese voor geobserveerde ontwikkeling van het bodemleven</b>	<b>23</b>
<b>4</b>	<b>Referenties</b>	<b>27</b>
	<b>Bijlage(n)</b>	
<b>A</b>	<b>GTSO transectiemetingen</b>	<b>A-1</b>





# 1 Introductie

## 1.1 Inleiding

Het steeds vaker voorkomen van 'witte matten' op de bodem was een van de aanleidingen voor de MIRT Verkenning naar de toekomst van het Grevelingenmeer. De witte matten werden aangeduid als schimmels die als gevolg van zuurstofloze condities het normale bodemleven verdreven. Condities die weer het gevolg zouden zijn van het gebrek aan dynamiek en de ophoping van organisch materiaal. Geobserveerd werd dat de witte matten op steeds meer plekken en ook steeds ondieper werden aangetroffen. Omdat objectieve monitoring ontbrak, was het hoe en waarom van het voorkomen van de witte matten gebaseerd op anekdotisch bewijs en op niet getoetste hypothesen.

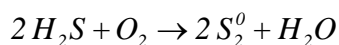
Tegelijkertijd werd herintroductie van het getij als oplossing van de problematiek gezien door verhoging van de dynamiek en verbetering (dat wil zeggen verhoging) van de zuurstofconcentratie in de waterkolom. Een doorlaatmiddel in de Brouwersdam wordt inmiddels in het kader van de MIRT Verkenning op haalbaarheid onderzocht, waarbij niet alleen de ecologie, maar ook economische activiteiten en energieopwekking centraal staan.

Door Deltares (2008, 2011) is onderzocht of herintroductie van het getij de zuurstofconditie in de waterkolom verbetert. Dat is het geval. Een essentiële link tussen het voorkomen van de witte matten en deze oplossingsrichting om de witte matten te verminderen en het bodemleven terug te laten keren, is echter nog niet gelegd.

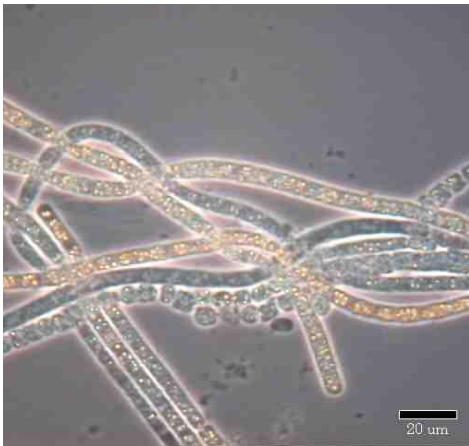
## 1.2 Geen schimmel maar een bacterie

Deltares (2008) heeft in samenwerking met Bureau Waardenburg inmiddels aangetoond dat ten onrechte gesproken werd over schimmels. De witte matten worden gevormd door de *Beggiatoa* bacterie.

*Beggiatoa* spp. komt voor als enkele cel, maar ook in filamenten van enkele tientallen cellen voor (Figuur 1.1). De bacterie oxideert zwavelelementen als energiebron. Meestal wordt hiervoor waterstofsulfide gebruikt. Bij dit proces wordt elementair zwavel gevormd wat de mat zijn witte kleur geeft:



Omdat de bacterie voor zijn metabolisme zowel zuurstof als waterstofsulfide nodig heeft, leeft de bacterie op het grensvlak van zuurstof en sulfide. Meestal bevindt dit grensvlak zich in de bodem en sulfide oxiderende bacteriën zoals *Beggiatoa* spp. komen dan ook in groten getale voor in mariene kustsedimenten zonder witte matten op het sedimentoppervlak te vormen (Mussmann, Schulz et al. 2003). Pas wanneer het grensvlak van zuurstof en sulfide boven of op het sedimentoppervlak komt te liggen, worden de bacteriekolonies zichtbaar (Fenchel and Bernard, 1995). De matten worden gevormd zodat van onder makkelijk zwavelwaterstof kan worden ingevangen en van boven het zuurstof, dat zich nog in de waterkolom bevindt.



Figuur 1.1 Strengen van *Beggiatoa* cellen (Bron: <http://filebox.vt.edu/>)

### 1.3 Vraagstelling en aanpak

Dit beknopte rapport probeert een antwoord te geven op twee onderzoeksvragen:

- 1 Wat is de (meest waarschijnlijke) verklaring voor het steeds meer voorkomen van de witte matten?
- 2 Wat gebeurt er met de witte matten als een doorlaatmiddel is aangelegd en een beperkt getij is geïntroduceerd?

Dit rapport presenteert daartoe gegevens over de bodem van het Grevelingenmeer uit vier verschillende bronnen:

- Monitoring benthische fauna (BIOMON)
- Opnames verspreiding van *Beggiatoa* en schade aan bodemleven (Bureau Waardenburg, 2010, 2011)
- Sedimentsamenstelling
- Zuurstofconcentratie en stratificatie in de waterkolom (GTSO)

Aanvullend is een beknopt literatuuronderzoek uitgevoerd.

De gegevens zijn wel afzonderlijk beschreven en geanalyseerd, maar nog niet eerder in een gezamenlijk verband gebracht ten behoeve van de twee onderzoeksvragen. Daarnaast heeft enkele jaren met verschillende partijen discussiëren over het Grevelingenmeer geleid tot een breder en dieper inzicht in het systeemgedrag, wat in niet onbelangrijke mate bijdraagt aan hetgeen in dit rapport wordt gepresenteerd.

Door alle bekende, relevante informatie bij elkaar te zetten wordt de discussie gestructureerd en kan een oplossing voor de witte matten beter onderbouwd in het beheer en de besluitvorming worden meegenomen, waarbij opgemerkt dient te worden dat de bodemproblemen niet het enige argument zijn voor herintroductie van het getij.

Twee delen van het rapport (paragrafen 2.1 en 2.5.2) zijn door dr. Larry Basch uitgevoerd en vanwege zijn niet Nederlandse afkomst in het Engels geschreven.

## 2 Overzicht van gegevens

### 2.1 Literatuuronderzoek: Basis biologie en ecologische relaties van *Beggiatoa*

Mats of the sulfur reducing, filamentous bacteria *Beggiatoa* spp. are found at many locations and depths, (including but not always areas with organic enrichment or pollution), often in areas of soft anoxic mud where there is limited water exchange with the open ocean (Fenchel and Bernard 1995a, b). These mats occur on the surface of the sediment at the hypoxic/anoxic interface, and *Beggiatoa* cells and filaments are found within the sediment. The development of *Beggiatoa* mats is related to environmental conditions such as organic input and reduced oxygen levels, which may have seasonal trends in some areas (Hill 2008). Anoxic conditions may also develop in deep water due to the presence of a thermocline in the summer months, e.g., some fjords (Diaz & Rosenberg, 1995; Gustafsson & Nordberg, 1999) and in Aberiddy Quarry (Hiscock & Hoare, 1973). These patterns and processes occur in the Grevelingenmeer as well (Bureau Waardenburg, 2010).

The sediment below mats is mostly depauperate due to low oxygen levels, which result in death or loss of most infauna and seafloor macrofauna (Hill 2008). A few polychaetes, gastrotrichs, and nematodes tolerant to low oxygen-high sulfide conditions may occur (Bernhard *et al.*, 2000). *Beggiatoa* excludes other heterotrophic bacteria and most macrofauna, with few components of infaunal communities that are usually characteristic of other muddy habitats. *Beggiatoa* spp. use sulfides leaching from the sediment, and oxidize them to sulfate to free energy for growth (Williams & Unz, 1989; Hagen & Nelson, 1997). Microorganisms present in the vicinity of mats -- e.g. ciliates, nematodes and euglenoid flagellates -- are probably decomposers/detritovores, feeding on non-living organic matter. The sediment below the mats is populated by chemoautotrophic bacteria that remineralize organic matter, producing methane, or sulfides of hydrogen (H<sub>2</sub>S), iron or manganese and are probably very similar to microbial communities found at depth in other sediments (Davies *et al.*, 1996). The few remaining low oxygen tolerant species are probably deposit feeders on the microbe rich sediment or scavengers (e.g. crabs, hermit crabs, and starfish) feeding on dead or dying fauna (Hill 2008). Mat formation blocks access to the sediment, interfering with recruitment, settlement, or utilization of space and resources associated with sediments by other organisms that are otherwise usually (capable of colonizing or being) present (interference competition).

*Beggiatoa* are able to consume a large proportion of oxygen at and near the sediment-water column interface, thereby lowering and limiting interstitial dissolved oxygen levels in underlying sediments available to aerobic life forms. Interstitial oxygen can be rapidly depleted resulting in the creation of anaerobic conditions, facilitated by the production and consumption of sulfides. These processes and conditions are exacerbated when low oxygen levels are present. If these conditions persist over a prolonged period they can result in localized areas of mat formation, and reduction or elimination of oxygen levels and populations of infaunal invertebrates (Hill 2008).

*Beggiatoa* tend to prefer areas rich in H<sub>2</sub>S including areas with increased nutrients; because of this *Beggiatoa* spp. mats are considered a good indicator of organic pollution. When O<sub>2</sub> is at reduced levels, a frequently occurring metabolic mechanism in bacteria is reduction of sulfur, which *Beggiatoa* may further contribute to by covering sediments, creating hypoxic or anoxic conditions that kill aerobic invertebrates. The dead invertebrates in turn would

increase levels of organic detritus and additional production of H<sub>2</sub>S. However, *Beggiatoa* is able to detoxify H<sub>2</sub>S in some substrates (Hill 2008).

Finally, *Beggiatoa* also consume and store nitrogen-nutrients, in the form of nitrates (Mussmann et al. 2003). Therefore, *Beggiatoa* mats may compete with other benthic organisms through at least one means. Mats may limit N-nutrients and other materials that would otherwise be available for other benthic organisms, a form of scramble competition. Most marine benthic organisms (bacteria, plants, most invertebrate animals) take up Dissolved Organic Matter (DOM) in nitrogenous and other forms (Hansell and Carlson 2002), and may compete with one another for available DOM. The outcome(s) of this type of competition relies on interspecific differences in body size, access to the resource, and differences in the mechanisms and rates of DOM uptake (Hansell and Carlson 2002). Bacterial cells have a larger Surface-Area-to-Volume ratio than larger organisms such as invertebrates. As a result bacteria and smaller organisms generally can take up oxygen, nutrients, and other dissolved materials in higher amounts and at faster rates relative to larger organisms; "Bergmann's Rule" (Schmidt-Nielsen 1984, Vogel 1988).

#### *Recruitment, Seasonal and Longer Term Dynamics of Beggiatoa*

*Beggiatoa* are probably ubiquitous, at least in low abundance, and therefore may at times be undetectable in visual surveys. Although growth rates of *Beggiatoa* in natural environments are not known, the generation time for many bacteria is short and growth is usually exponential under optimal conditions (e.g. some bacteria populations can double in 20 minutes). Bacterial colonies can spread rapidly via asexual reproduction. In many bacteria species resting stages, spores and cysts may occur that allow them to survive for long periods undetected, returning to normal growth when conditions are good. Therefore, in favorable conditions -- low oxygen concentrations and sulfides in sediments -- *Beggiatoa* mats are likely to form and spread rapidly (Hill 2008). In addition, *Beggiatoa* are known to migrate vertically up and down within the sediment on a diurnal cycle (<http://microbewiki.kenyon.edu/index.php/Beggiatoa#Ecology>). Based on the above information these bacterial mats can be quite dynamic, and may appear and disappear quickly. This could confound results of short-term or one-time benthic surveys, as well as inferences about the interactions with, and effects of *Beggiatoa* on other benthic organisms, and the assemblage as a whole.

#### *Habitat structure and complexity*

The habitat has low structural complexity because the surface of the sediment is covered with a mat of the filamentous bacteria, reducing access to sediments for recruitment or burrowing of infaunal organisms, while creating uninhabitable anoxic, sulfide-rich conditions that kill existing infauna (Hill 2008). Scavenging species such as the sea star *Asterias rubens* and the crab *Carcinus maenas* typically occur where the habitat is not too anoxic but in extreme anoxic conditions little survives other than *Beggiatoa*. The mats can provide habitat for an abundant meiofaunal community (Bernhard et al., 2000) such as nematodes and small ciliates (Spies & Davis, 1979). The combination of anoxic conditions and the related production of sulfides (e.g. H<sub>2</sub>S) is highly toxic to most life (Diaz & Rosenberg, 1995) and the underlying sediment may be effectively defaunated and abiotic. Where conditions are not anoxic but severely hypoxic, *Beggiatoa* may be patchy, with an impoverished infauna present (Hill 2008).

### Productivity

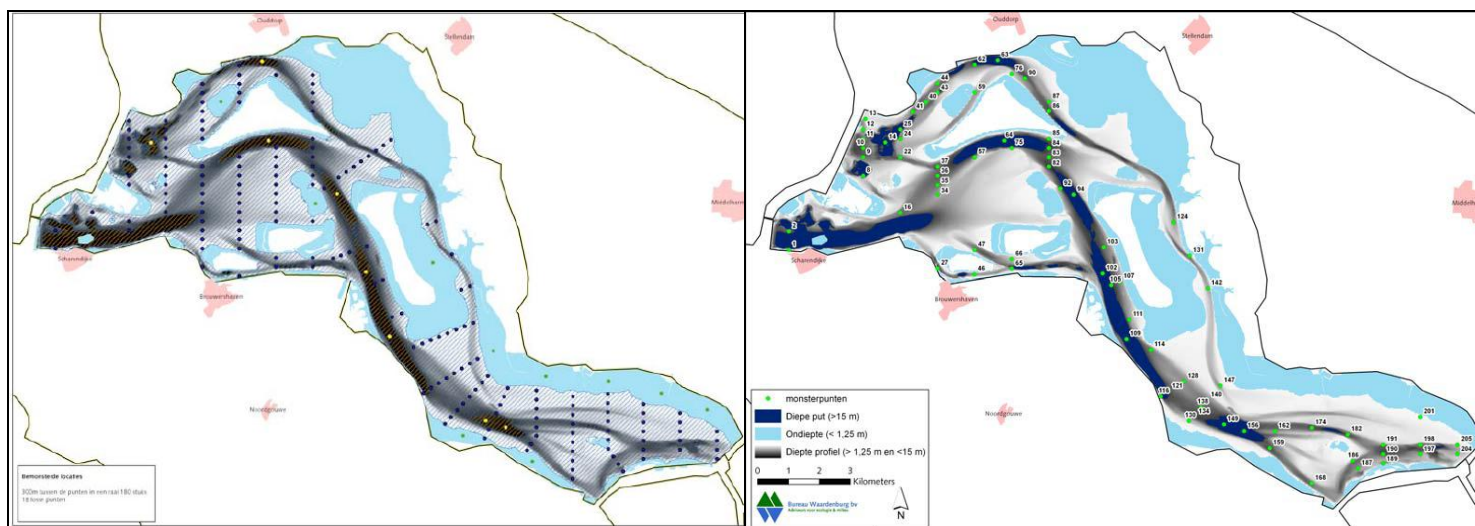
Productivity in this type of habitat is limited to anaerobic chemoautotrophic bacteria and of the sulfur-oxidizing bacteria *Beggiatoa* spp., and bacterial mats may be important sources of organic matter in coastal oxygen minimum zones. In places with benthic cover dominated by bacterial mats, benthic-pelagic coupling has been shown to be weakened and the food chain shortened (Diaz & Rosenberg 1995).

## 2.2 Verspreiding van *Beggiatoa* en schade aan bodemleven

Deze paragraaf is een samenvatting van Bureau Waardenburg (2010) en (2011).

De bacterie *Beggiatoa* wordt in de discussies over het Grevelingenmeer gezien als een indicator voor de ecologische achteruitgang. Gegevens over het waar en wanneer voorkomen van *Beggiatoa* zijn vooral anekdotisch. Structurele gegevens over zowel de ruimtelijke verspreiding als de variatie in de tijd ontbreken. Desalniettemin wordt aangenomen dat *Beggiatoa* op steeds meer locaties voorkomt en dat *Beggiatoa* ook op steeds ondiepere locaties wordt gevonden.

In het kader van de MIRT-Verkenning Grevelingen is door Bureau Waardenburg de ruimtelijke verspreiding van *Beggiatoa* en de schade aan het bodemleven in kaart gebracht (Bureau Waardenburg, 2010, 2011). Van 25 augustus tot en met 1 september 2010 is op bijna 200 locaties door middel van een videocamera geïnventariseerd of *Beggiatoa*, schade aan het bodemleven, Japanse Oester en/of zeesla zichtbaar is (Figuur 2.1). Van 17 tot 22 maart 2011 is op de 77 locaties die in 2010 waren aangemerkt als problematisch, opnieuw een inventarisatie uitgevoerd (Figuur 2.1).

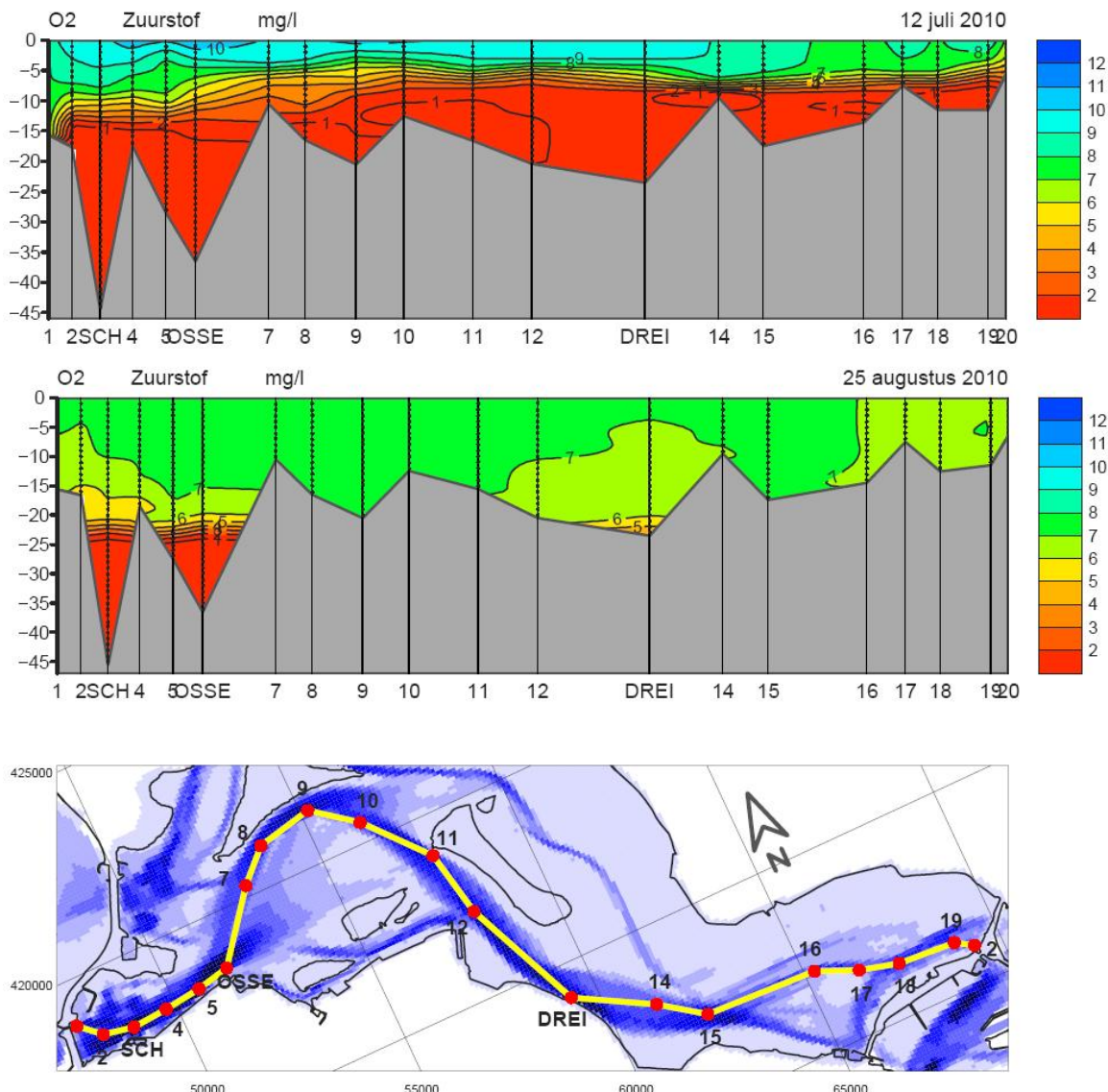


Figuur 2.1 *Inspectielocaties verspreid over het Grevelingenmeer. Rechts: Locaties aug.-sept. 2010: 180 locaties verdeeld over raaien dwars op de geulen, 18 locaties verdeeld over de diepe putten (<15 m) en ondiepe delen (1,25 m) (Figuur 2.1 in Bureau Waardenburg (2010)); Links: Locaties maart 2011: 77 locaties die in 2010 als problematisch werden aangemerkt (Figuur 2.1 in Bureau Waardenburg (2011))*

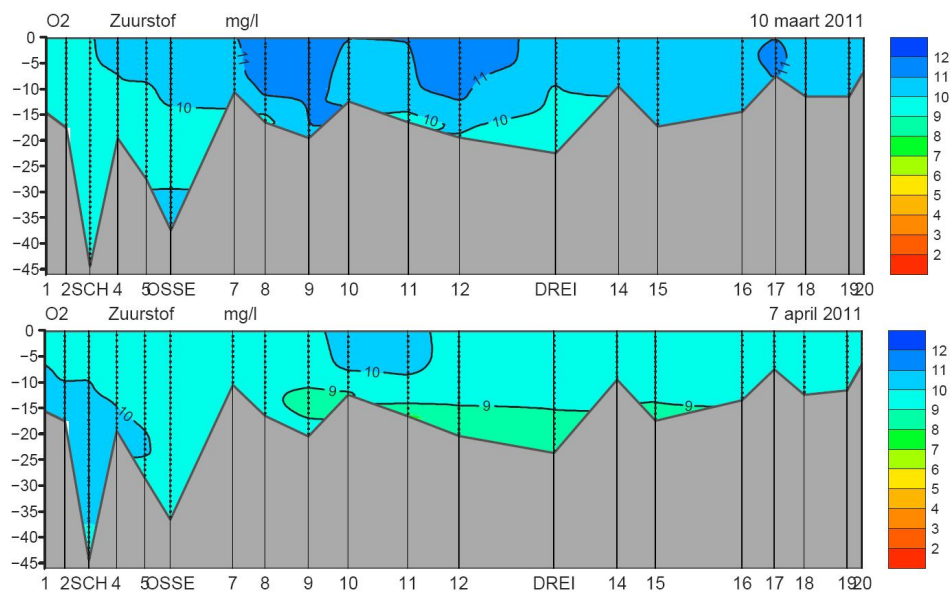
In de week voorafgaande aan de 2010 opname stond er een harde wind (NO 5-7) waardoor de waterkolom ten tijde van de opname goed gemengd was, met uitzondering van de diepe putten bij de Brouwerssluis (Figuur 2.2). Eerder in de zomer van 2010 was er wel sprake van zuurstofloze condities op uitgebreide schaal, waarbij de spronglaag op ongeveer 7 meter diepte lag in het midden en oosten en op ongeveer 12 meter diepte in het westen bij de Brouwerssluis.

In maart 2011 werd er geen lage zuurstofconcentratie gemeten in de waterkolom (Figuur 2.3). In april 2011 was de concentratie wel iets lager, maar nog steeds niet zuurstofarm.

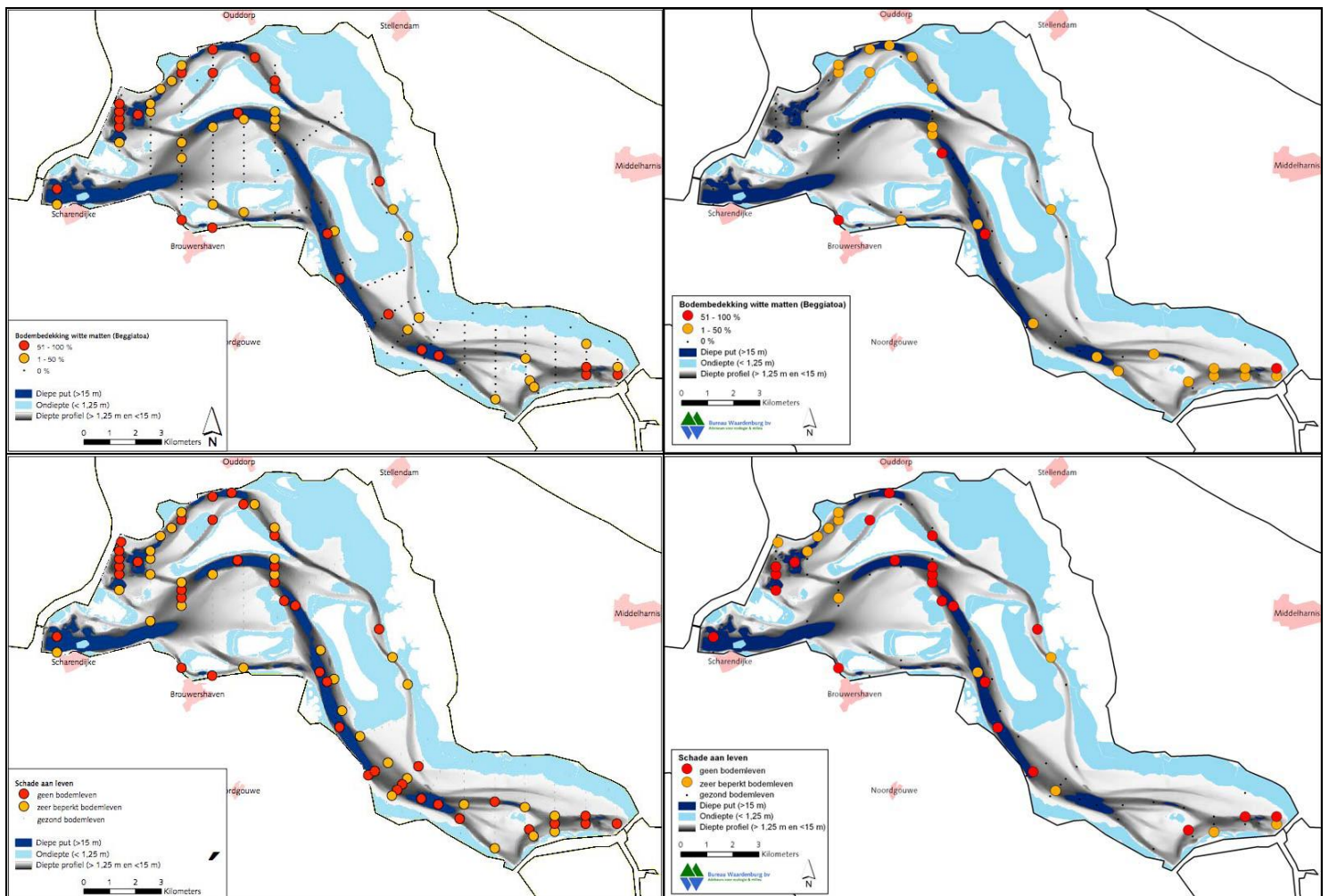
Figuur 2.4 toont de aangetroffen verspreiding van *Beggiatoa* en van schade aan het bodemleven in de zomer van 2010 en het vroege voorjaar van 2011.



Figuur 2.2 Gemeten zuurstofconcentratie in het Grevelingenmeer op 12 juli 2010 (boven) en 25 augustus (midden) in een raai door de zuidelijke geul (onder) (Bron: hmcz.nl – GTSO metingen)



Figuur 2.3 Gemeten zuurstofconcentratie in het Grevelingenmeer op 10 maart 2011 (boven) en 7 april 2011 (onder) (Bron: hmcz.nl – GTSO metingen)



Figuur 2.4 Verspreiding van Beggiatoa (boven) en van schade aan bodemleven (onder) in aug.-sept. 2010 (links) en maart 2011 (rechts) (Bron: Figuren 3.1 en 3.3 in Bureau Waardenburg (2010) en (2011))

## 2010

Bureau Waardenburg (2010) merkt op dat er geen eenduidige relatie gevonden is tussen de diepte en de verspreiding van *Beggiatoa*. Hoewel over het algemeen meer bedekking met *Beggiatoa* voorkomt als de diepte toeneemt, zijn er genoeg uitzonderingen op de regel. Op minder dan 6 meter diepte komen toch vier locaties met een relatief beperkte bedekking voor; op het merendeel van de ondiepe locaties wordt geen *Beggiatoa* gevonden. Op grotere diepte zijn echter ook genoeg locaties waar de bacterie niet gevonden wordt.

De schade aan bodemleven vertoont een duidelijker relatie met de diepte. Dieper dan 6 meter wordt op 78% van de locaties schade aan het bodemleven gezien en dieper dan 13 meter wordt geen bodemleven meer aangetroffen.

Een kruistabel van bedekking met *Beggiatoa* en verspreiding van schade aan bodemleven laat zien dat de bedekking met *Beggiatoa* geen goede maat is voor schade aan het bodemleven. Op 26 locaties wordt geen witte mat gezien, maar is er wel zichtbare schade of is alles dood. Op 46 locaties is er wel zowel bedekking en schade aan het bodemleven. Met 64% score (46 van (46+26) locaties) blijkt de aanwezigheid van witte matten een matige maat voor de ecologische toestand van de bodem.

Tabel 2.1 Kruistabel van het bedekkingspercentage witte matten en schade aan het bodemleven. Weergegeven is het aantal locaties wat binnen de gestelde klassen valt (Bron: Tabel 3.1 uit Bureau Waardenburg, 2010)

Schade aan bodemleven	Bedekking met witte matten		
	0%	1-50%	>50%
Geen schade	121	5	0
Zichtbare schade	11	18	3
Alles dood	15	4	21

## 2011

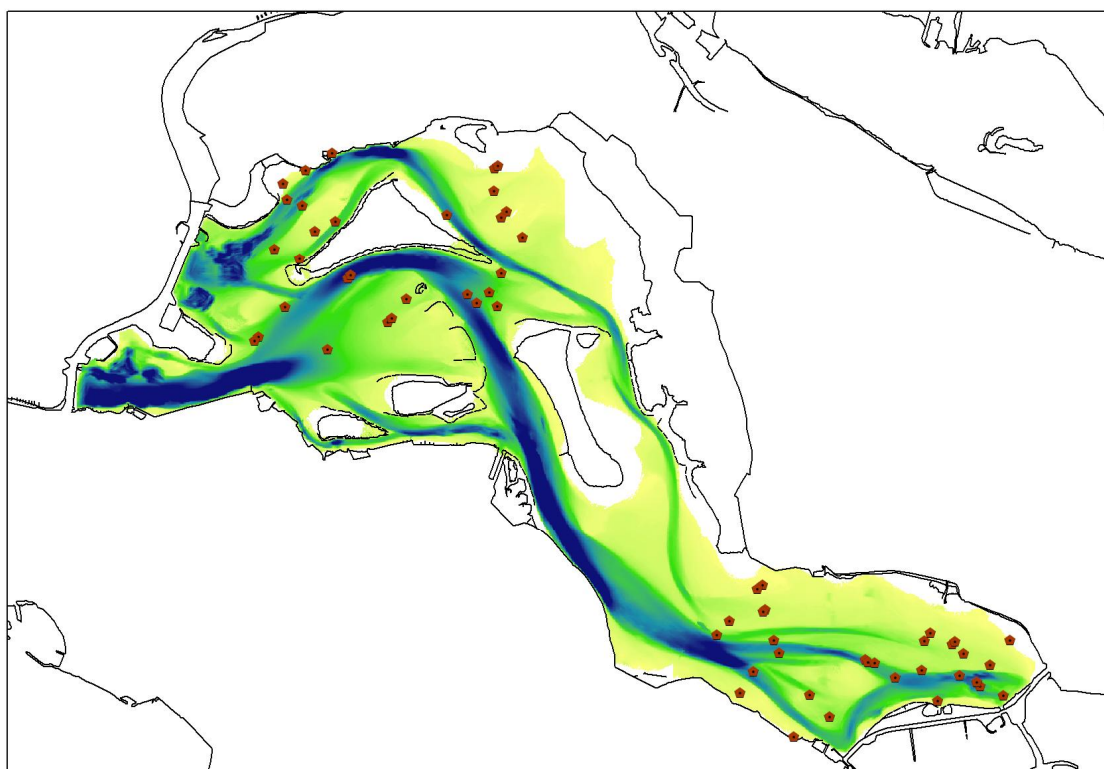
Bureau Waardenburg (2011) concludeert dat de aanwezigheid van witte matten in bacteriematten sterk is afgenomen ten opzichte van 2011. Op 49 locaties in de bedekking afgenomen, maar op 6 locaties toch ook toegenomen. Op 22 locaties was de bedekking hetzelfde. Verder stelt Bureau Waardenburg (2011) vast dat op 39 van de 77 onderzochte locaties waar in 2010 sprake was van 'zichtbare schade aan het bodemleven', in het voorjaar 2011 enige mate van herstel van de bodemdiergemeenschap zichtbaar was. Op deze locaties werden slechts 'eerste tekenen' van herstel waargenomen, er was nog geen sprake van een gezonde bodemdiergemeenschap. Opmerkelijk is dat op enkele locaties herstel van bodemleven zichtbaar is, terwijl de witte matten nog niet helemaal verdwenen zijn. Er wordt een zwakke significantie bepaald waaruit blijkt dat in ondiepe delen van het meer vaker herstel van bodemleven heeft plaatsgevonden dan in de diepere delen.

Overigens is door de locatiesselectie in 2011 min of meer verondersteld dat op de locaties waar in 2010 geen problemen waren, nu nog steeds geen problemen zijn. Dit is zeker op hoofdlijnen niet onaannemelijk, maar desalniettemin niet bewezen.



## 2.3 Sedimentsamenstelling

Het Hydro Meteo Centrum Zeeland (HMCZ) heeft een dataset aangeleverd waarin de sedimentsamenstelling voor vijf jaren (1999, 2000, 2002, 2006 en 2007) is opgenomen. De dataset bevat het percentage organisch stof, het percentage kalk, en de korrelgrootteverdeling. Er is op 60 locaties bemonsterd, gelijkmatig verdeeld over een westelijk deel rondom de Hompelvoet en een oostelijk deel.



Figuur 2.5 Bemonsteringslocaties sedimentkwaliteit

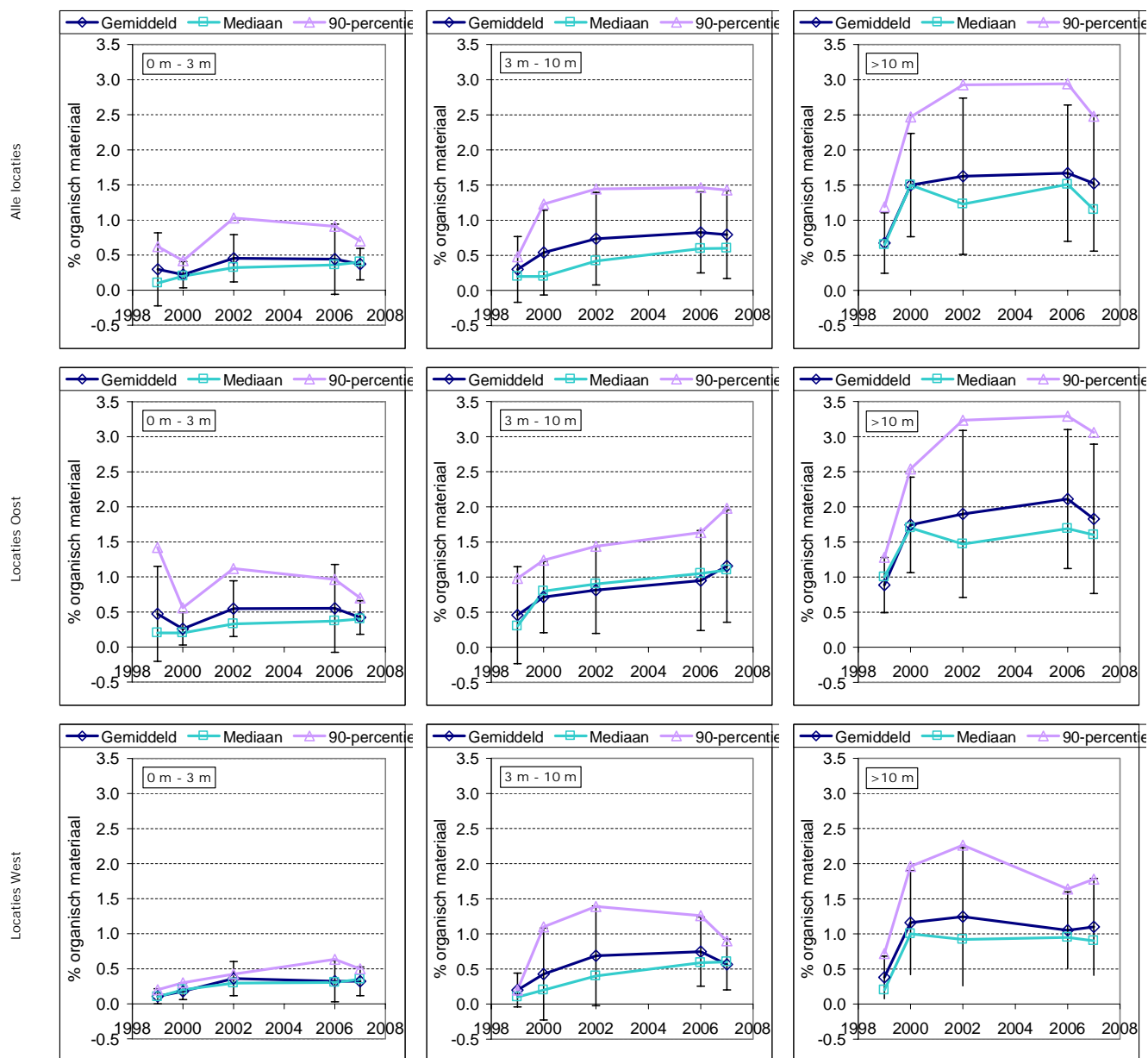
Figuur 2.6 en Figuur 2.7 tonen het verloop van respectievelijk het percentage organisch materiaal en de D50 (mediane) korrelgrootte van 1999 tot 2007 onderverdeeld naar diepteklasse en naar oost en west.

Hoewel het percentage organisch materiaal een zekere spreiding laat zien, zijn er enkele trends zichtbaar:

- Het percentage organisch materiaal neemt toe met de diepte. In de diepteklasse tussen 0 en -3 m NAP is het percentage over het algemeen lager dan 1%, terwijl de diepteklasse onder -10 m NAP over het algemeen meer dan 1% organisch materiaal heeft.
- Het percentage organisch materiaal is iets hoger in het oostelijk deel dan in het westelijk deel. Voor de diepteklasse tussen 0 en -3 m NAP is het verschil nihil; De mediaan is minder dan 0,1% verschillend. Voor de ander twee diepteklassen is de mediaan in het oosten ongeveer 0,5% hoger dan in het westen.
- De standaarddeviatie rondom het gemiddelde is vrij groot. In 70% van de metingen is de standaarddeviatie even groot tot de helft van de gemiddelde waarde. Vooral bij lage percentages organisch materiaal in de ondiepe diepteklasse is de

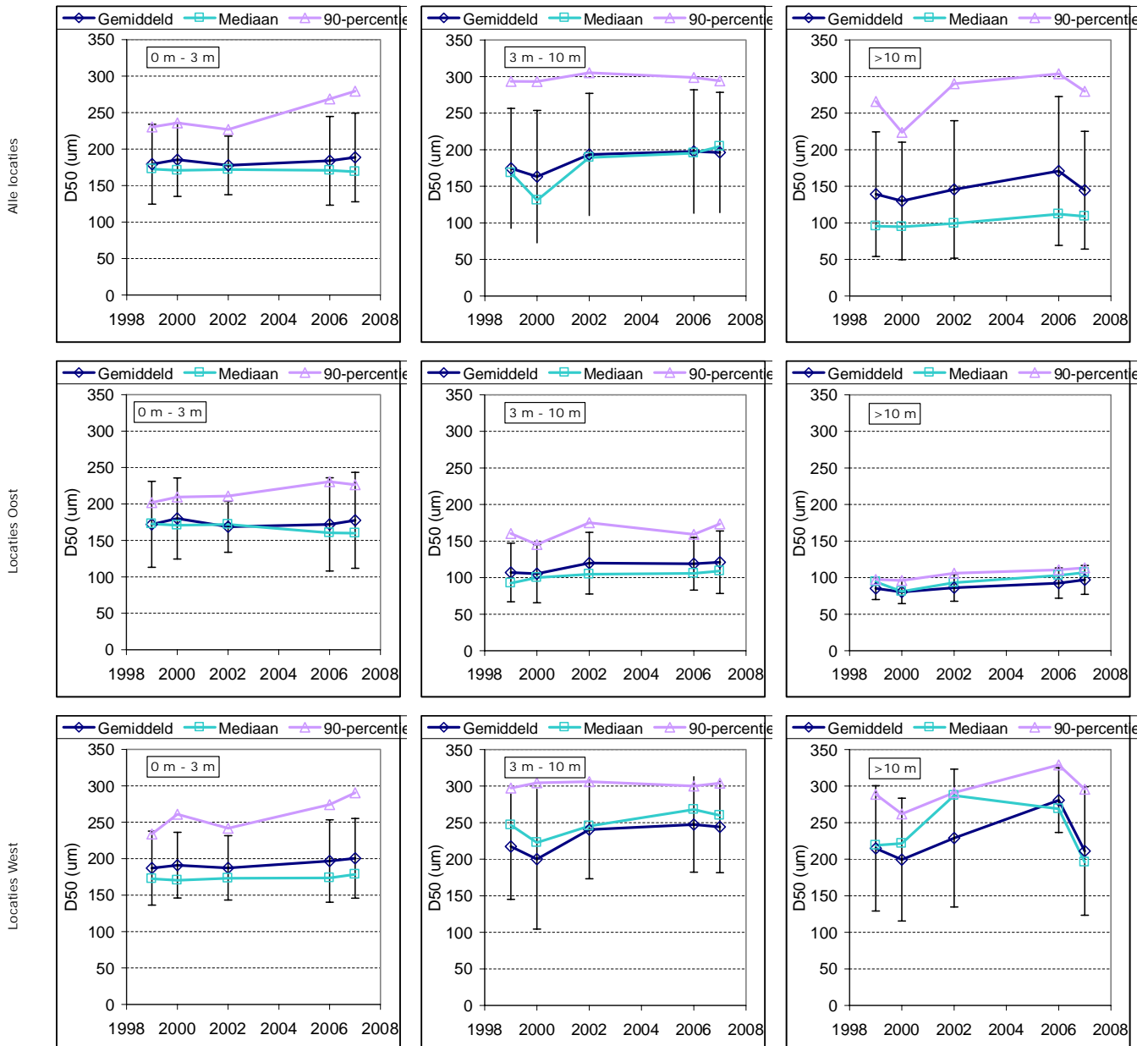
standaarddeviatie zelfs groter dan de gemiddelde waarde. Hierdoor zal een statistische toets niet snel een significant verschil opleveren. Op het oog schijnbare trends moeten dus voorzichtig geïnterpreteerd worden.

- In de diepteklasse onder -10 m NAP is een sprong zichtbaar van 1999 naar 2000. Niet duidelijk is wat de oorzaak zou kunnen zijn. Daarna – van 2000 tot 2007 – is geen toe- of afname van het percentage organisch materiaal in deze diepteklasse aanwijsbaar.
- In de diepteklasse tussen 0 en -3 m NAP is evenmin een trend aanwezig, met uitzondering misschien van een licht stijgende trend tussen 1999 en 2002 in het westelijk deel. Na 2002 blijft ook daar het percentage gelijk.
- De middelste diepteklasse tussen -3 en -10 m NAP vertoont enigszins een schijnbaar stijgende trend. Echter, gezien de grootte van de standaarddeviatie kan niet gesteld worden dat de stijging statistisch significant is.



Figuur 2.6 Percentage organische materiaal per diepteklasse voor alle locaties (boven) en uitgesplitst naar oostelijke locaties (midden) en westelijke locaties (onder)

Wat betreft de tijdsontwikkeling van de D50 (Figuur 2.7) wordt geconstateerd dat de D50 tussen 1999 en 2007 constant is gebleven, ofwel (ruim) binnen de standaarddeviatie enige variatie vertoont. Ruimtelijk is wel te constateren dat het westen een hogere D50 heeft dan het oosten, waarbij het verschil het grootst is in de diepteklasse onder -10 m NAP. Het oostelijk deel van het Grevelingenmeer is slibrijker (D50 minder dan 100  $\mu\text{m}$ ) dan in het westen (D50 gemiddeld groter dan 200  $\mu\text{m}$ ).



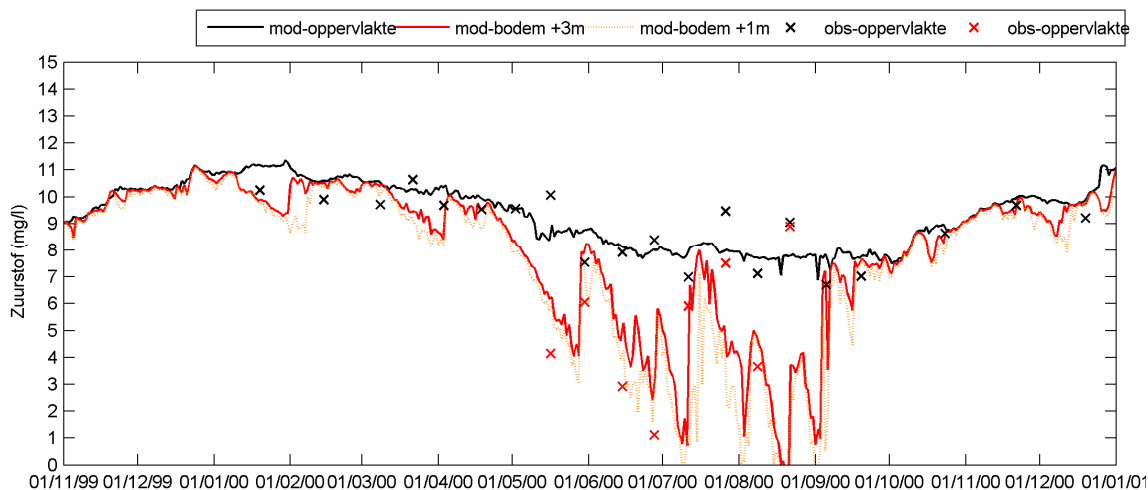
Figuur 2.7 D50 korrelgrootte per diepteklasse voor alle locaties (boven) en uitgesplitst naar oostelijke locaties (midden) en westelijke locaties (onder)

## 2.4 Zuurstofconcentratie en stratificatie in de waterkolom (GTSO)

Zoals al in paragraaf 2.2 vermeldt, wordt door het HMCZ frequent een raai gevaren in het Grevelingenmeer en wordt op 20 locaties een verticaal profiel van ondermeer de zuurstofconcentratie gemeten (zie ook Figuur 2.2). NB: ook zoutgehalte, temperatuur en pH worden gemeten.

De ontwikkeling van de zuurstofconcentratie op basis van deze zogenaamde GTSO metingen is onlangs door Rijkswaterstaat (2011) in de bekkenrapportage beschreven. Het overzicht van de metingen in paragraaf 7.2.1 van Rijkswaterstaat (2011) wordt gereproduceerd in Bijlage A.

Samenvattend wordt geconstateerd dat de diepere delen van het Grevelingenmeer vrijwel ieder jaar sinds 2000 gedurende enige tijd zuurstofarm zijn. Onder andere op basis van modellering is duidelijk dat zuurstofarme perioden niet gedurende de hele zomer hoeven voor te komen, maar dat een lage zuurstofconcentratie zich gedurende enkele weken kan opbouwen, waarna weer menging met zuurstofrijker water optreedt (Figuur 2.8).



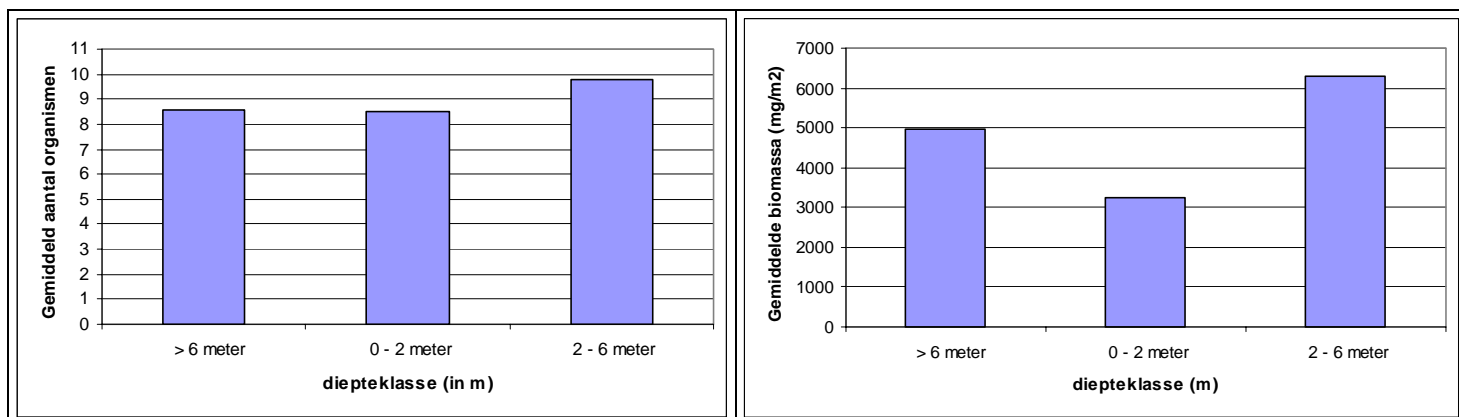
Figuur 2.8 Berekende opgelost-zuurstofconcentratie (in mg/l) vergeleken met metingen op locatie Dreischor (Figuur 3.8 uit Deltares, 2010)

## 2.5 Benthische fauna (BIOMON)

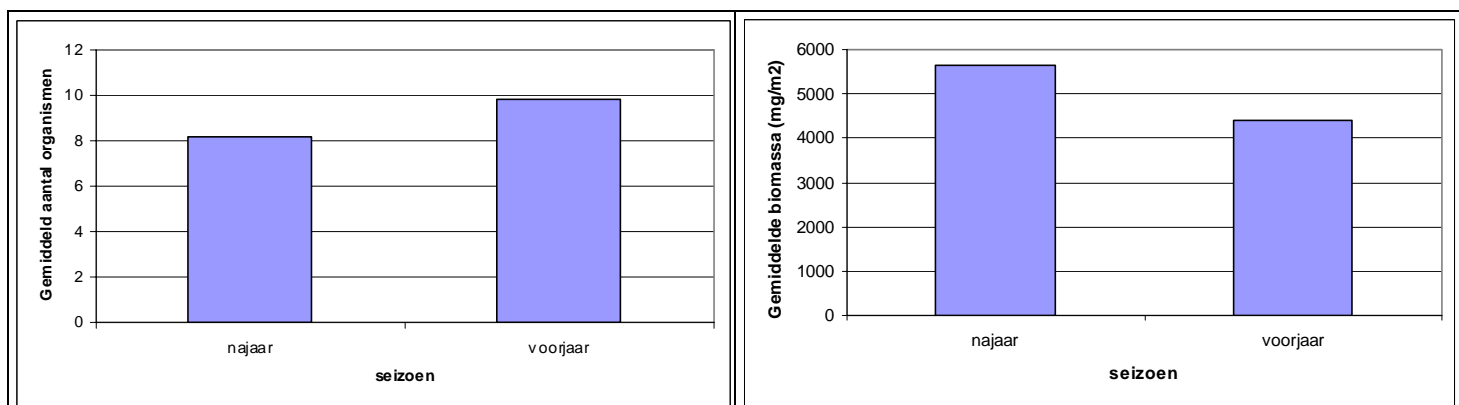
Het eerste deel van de paragraaf toont een beknopt overzicht van de BIOMON database met enkele observaties en constatering. Het tweede deel van de paragraaf bevat een beknopte analyse.

### 2.5.1 Overzicht van gegevens

De bewerking volgt het rapport van Deltares (2010a). Om effecten van outliers en zeldzame soorten in de analyse te minimaliseren zijn soorten die minder dan zes keer voorkwamen verwijderd. Zoals in Ysebaert & Herman (2002) zijn alleen soorten die tot op genusniveau zijn gedetermineerd, meegenomen (behalve Nemertea en Oligochaeta) en sommige taxa zijn per genus gegroepeerd (Polydora, Eteone, Malacoceros en Anaitides). Daarnaast zijn grote mobiele soorten zoals krabben verwijderd, en zijn monsters met mosselen of oesters in zijn geheel verwijderd. Deze laatste twee soorten hebben mogelijk sterke invloed op de sedimentsamenstelling, waardoor de link met abiotiek moeilijker te maken is in aanwezigheid van deze soorten.



Figuur 2.9 Gemiddeld aantal organismen per diepteklasse (links) en gemiddelde biomassa per diepteklasse (rechts)



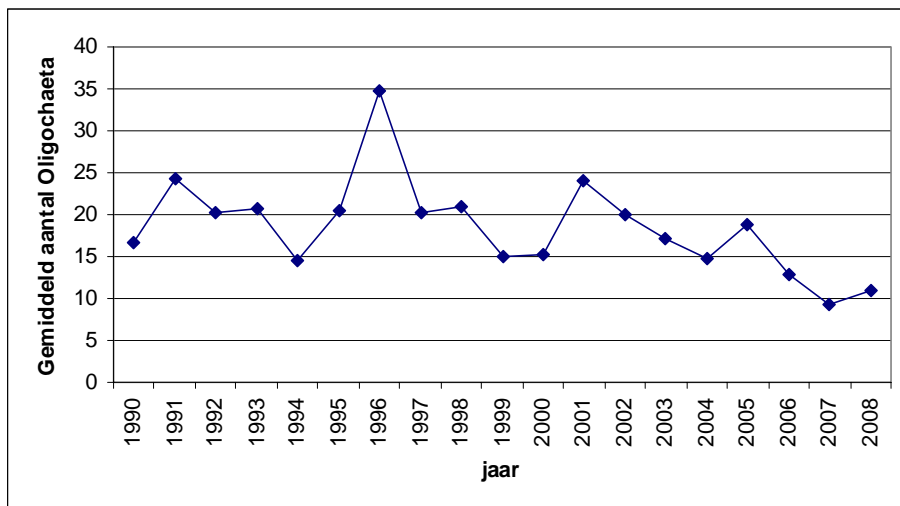
Figuur 2.10 Aantal organismen per seizoen (links) en gemiddelde biomassa per seizoen (rechts)

Het gemiddelde aantal organismen per diepteklasse is ongeveer gelijk tussen 0-2 m en >6 m. Tussen de 2 en 6 is het gemiddelde aantal organismen iets hoger dan in de andere diepteklassen (Figuur 2.9 links). De gemiddelde biomassa is het hoogst tussen de 2 en 6 meter, en het laagst tussen de 0 en 2 m (Figuur 2.9 rechts). Er is geen verschil tussen de deelgebieden qua gemiddeld aantal organismen (figuur niet getoond).

In het voorjaar worden gemiddeld hogere aantallen organismen gevonden dan in het najaar (Figuur 2.10 links). In het najaar is de gemiddelde biomassa hoger dan in het voorjaar (Figuur 2.10 rechts).

## Oligochaeten

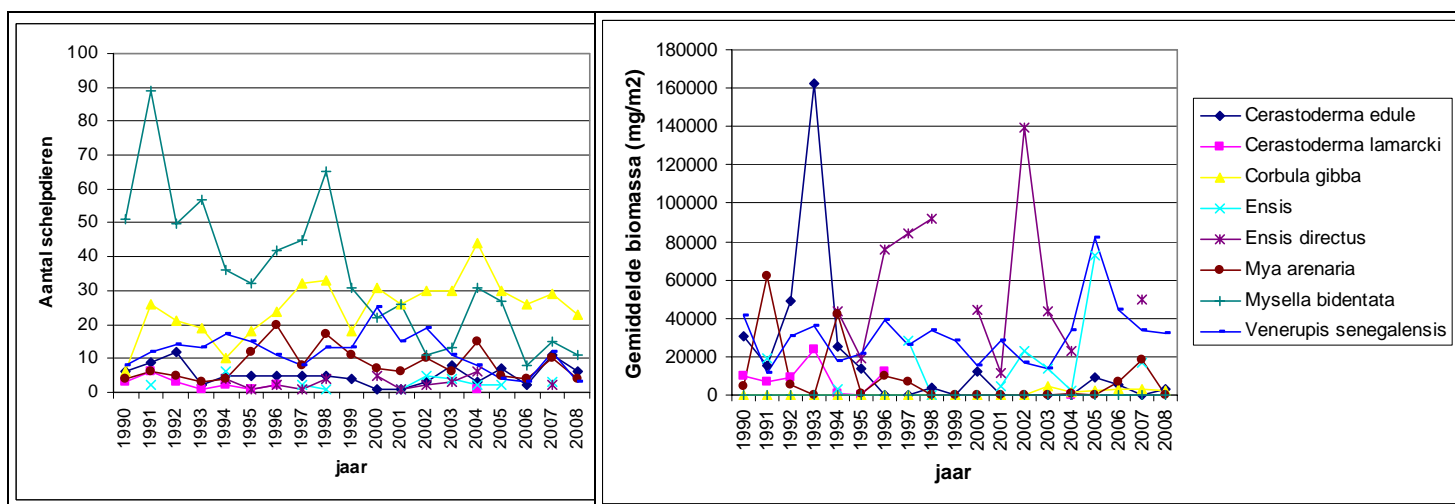
Het aantal *Oligochaeten* laat een lichte neerwaartse trend zien.



Figuur 2.11 Het gemiddeld aantal Oligochaeten per jaar.

## Schelpdieren

Bij de schelpdieren overheerst tot 2000 in aantallen *Mysella bidentata* (Tweetandschelp), maar deze vertoont een neerwaartse trend. *Corbula gibba* neemt over de jaren licht toe. Andere soorten, zoals *Ensis* en de kokkel (*Cerastoderma edule*), zijn in kleinere aantallen aanwezig en blijven gedurende de jaren ongeveer gelijk. Onder andere *Venerupis senegalensis* en *Mya arenaria* namen in de jaren '90 toe, om daarna weer af te nemen in de jaren '00.

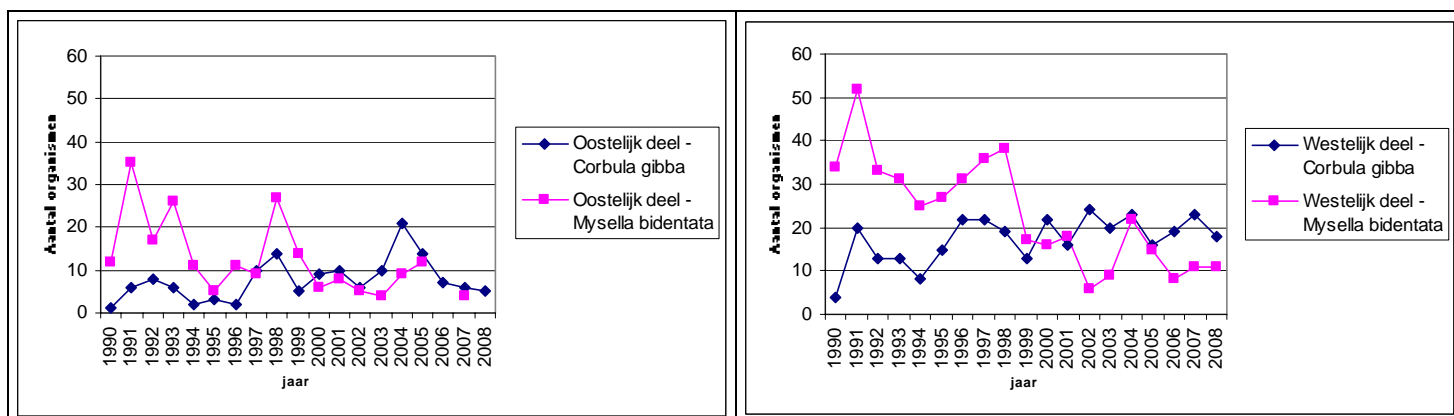


Figuur 2.12 Het aantal schelpdieren per jaar (links) en Gemiddelde biomassa per jaar (rechts) voor verschillende soorten schelpdieren.

Qua biomassa heeft een aantal soorten een paar uitschieters (*Cerastoderma edule*, de kokkel, in najaar 1993 en *Ensis directus* in 2002). Verder zijn er niet echt trends in biomassa te ontdekken.

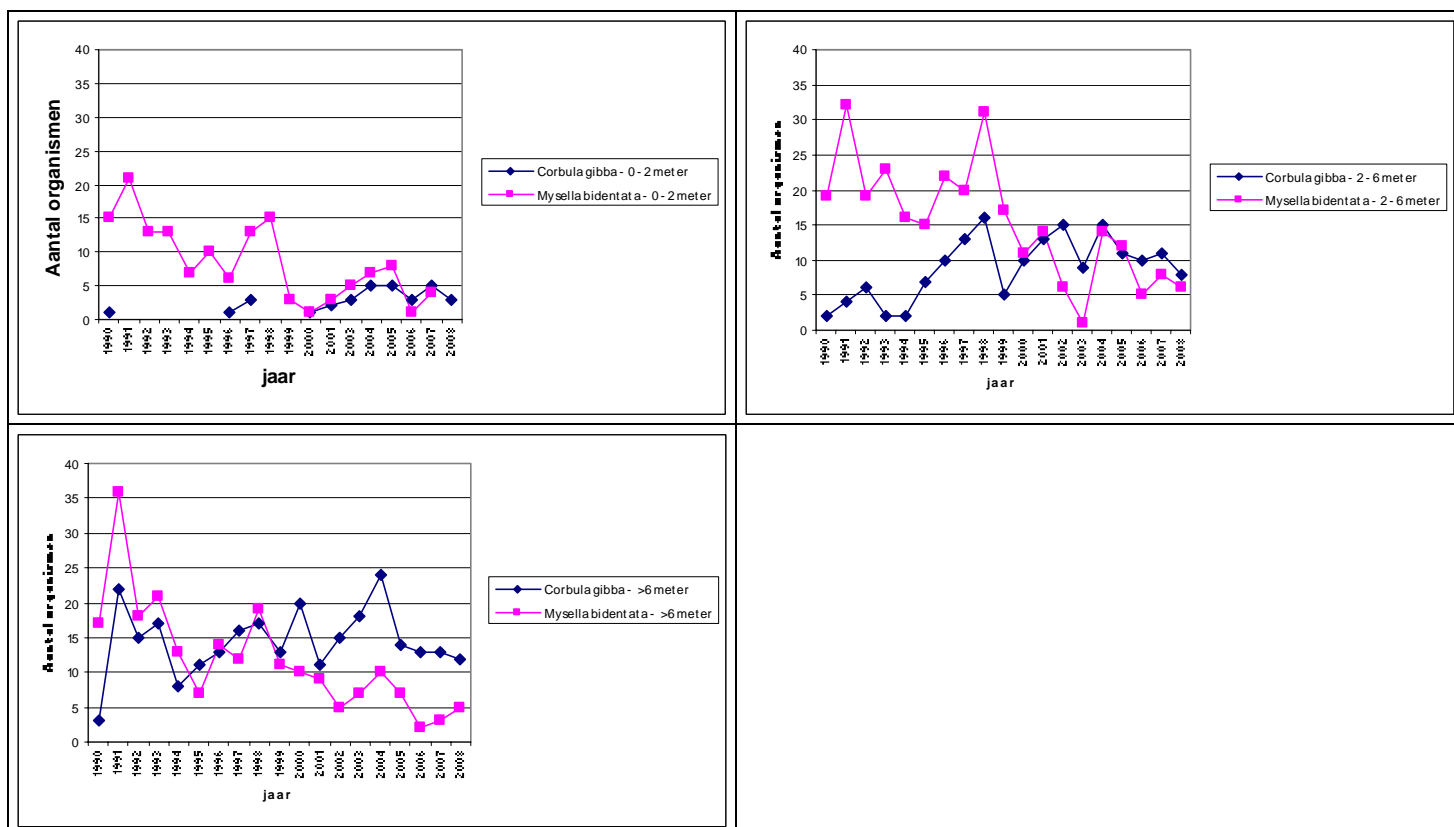
*Mysella bidentata* (Tweetandschelp) en *Corbula gibba* (Korfschelp)

De twee soorten schelpdieren die een trend vertonen in aantallen en dichtheden vertonen, de Tweetandschelp en de Korfschelp, worden hier nader gepresenteerd. Verschillen tussen deelgebieden Oost en West en tussen de verschillende diepteklassen worden weergegeven.



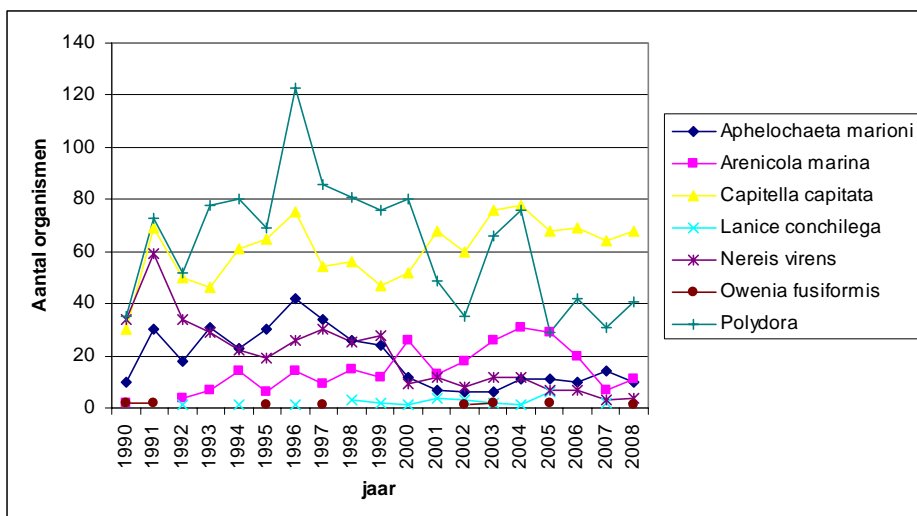
Figuur 2.13 Het aantal organismen voor *Corbula gibba* en *Mysella bidentata* per jaar in deelgebied Oost (links) en West (rechts).

In de jaren '90 domineert bij de schelpdieren qua aantallen *Mysella bidentata*, maar in de jaren '00 is *Corbula gibba* in grotere aantallen aanwezig. In het Westen zijn de aantallen van beide soorten hoger dan in het Oosten. In de ondiepere delen van de Grevelingen komt in de jaren '90 nauwelijks *Corbula gibba* voor, maar neemt in de jaren '00 toe. In de diepere delen >6 m komen er grotere aantallen *C. gibba* voor, en werden ze ook al in de jaren '90 gevonden.



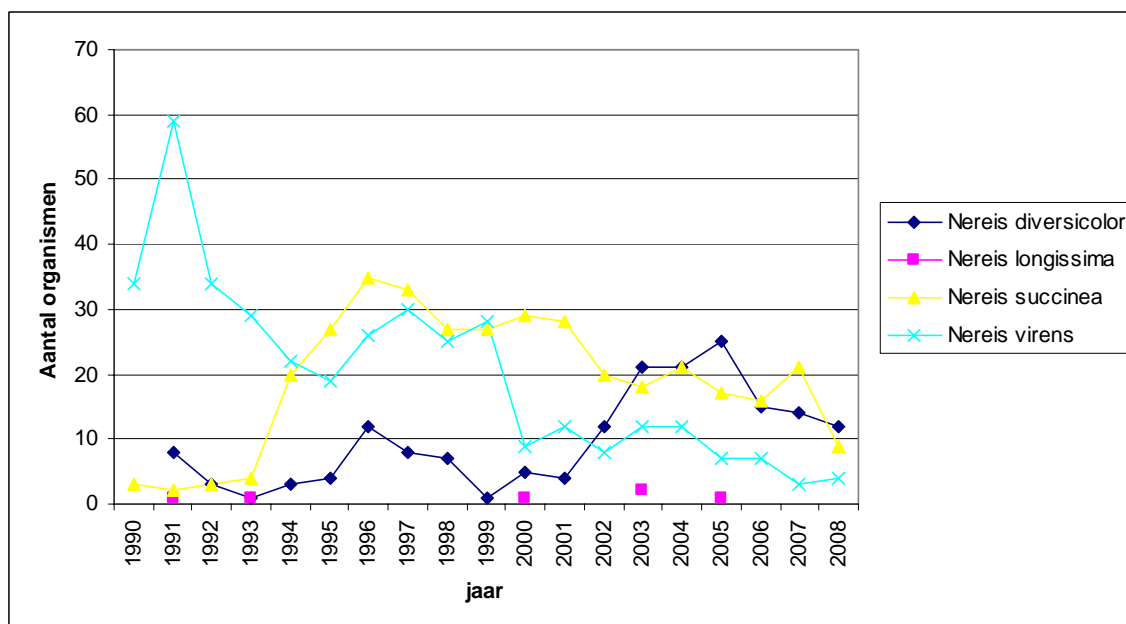
Figuur 2.14 Het aantal organismen *C. gibba* en *M. bidentata* in diepteklasse 0-2 m, 2-6 m en >6 m

## Wormen



Figuur 2.15 Aantallen organismen door de jaren heen voor verschillende soorten wormen.

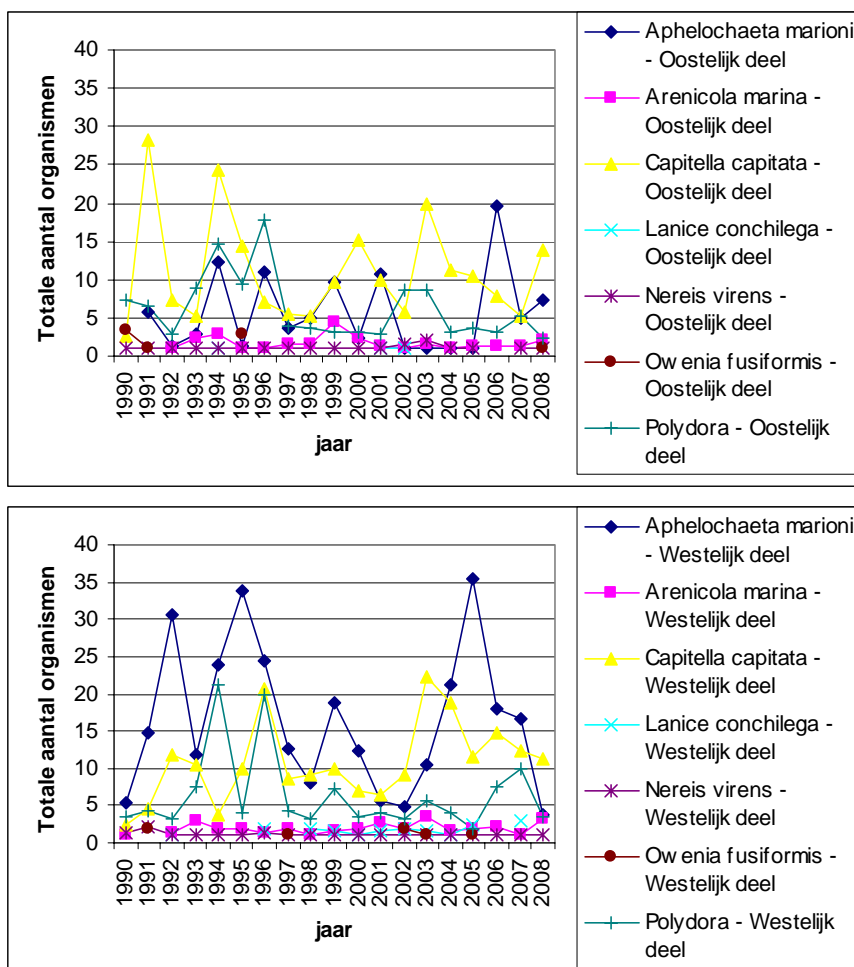
Ook bij de wormen zijn verschuivingen in de soorten waar te nemen. Zo nemen *Arenicola marina* en *Capitella capitata* over de jaren toe, terwijl andere soorten zoals *Nereis virens* en *Aphelochaeta marioni* in aantallen afnemen. In het algemeen komt er weinig *Owenia* en *Lanice* voor, eigenlijk worden alleen individuen gevonden op meer dan 6 m diepte. *Polydora* kwam in de jaren '90 qua aantallen het meeste voor, maar in de jaren '00 laten deze een afname zien.



Figuur 2.16 Aantallen organismen door de jaren binnen Nereis.

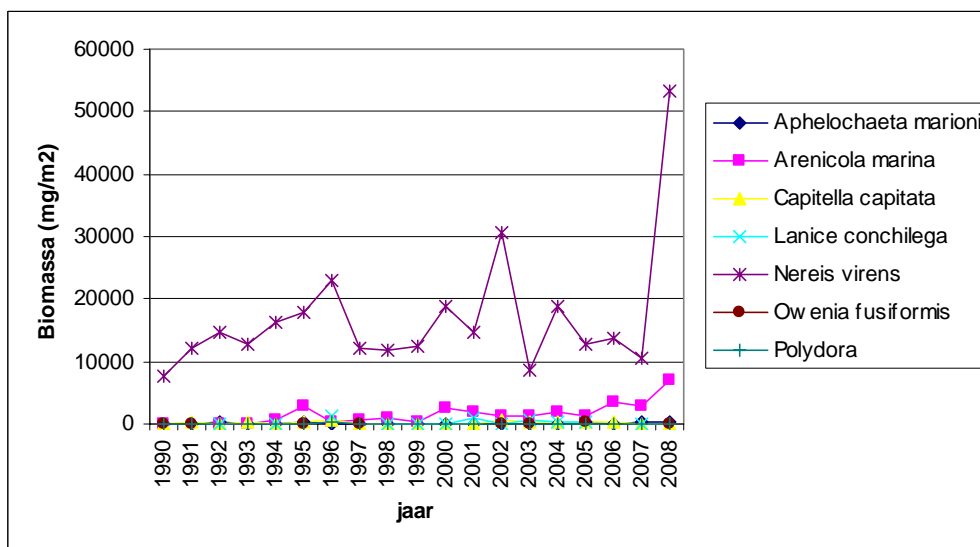
Ook binnen de *Nereis* vinden verschuivingen plaats; waar eerst *N. virens* domineerde, komen in de jaren '00 *N. succinea* en *N. diversicolor* in grotere aantallen voor.





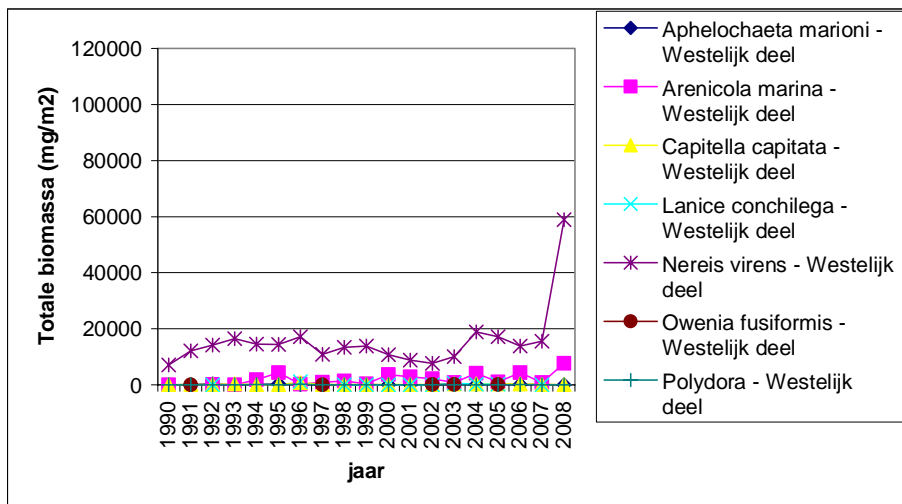
Figuur 2.17 Totaal aantal organismen per jaar in deelgebied oost (boven) en west (onder).

In het oosten domineert qua gemiddelde aantallen bij de wormen *Capitella capitata*. In het westen domineert qua gemiddelde aantallen *Aphelochaeta marioni*.



Figuur 2.18 De totale biomassa per jaar van verschillende soorten wormen.

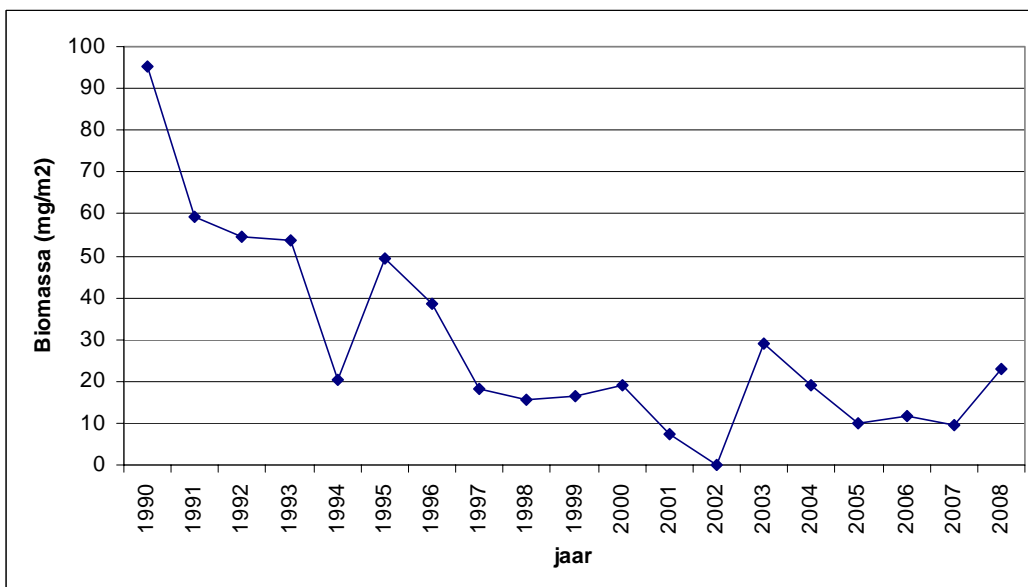
Qua biomassa domineert *Nereis virens* bij de wormen. Daarna is *Arenicola marina* de soort met de hoogste biomassa. Deze neemt door de jaren heen ook toe.



Figuur 2.19 De totale biomassa per jaar van verschillende soorten wormen in deelgebied oost (boven) en west (onder).

In het oosten domineert qua biomassa *Nereis virens*. Deze soort vertoont in een aantal jaren (1995, 2002) flinke uitschieters. Verder is er een opwaartse trend waar te nemen in de biomassa van *Arenicola marina*. In het westen domineert *Nereis virens* ook, maar er zijn minder uitschieters dan in het oosten. Verder is de biomassa van *Arenicola* gemiddeld hoger in het westen dan in het oosten.

### *Hydrobia ulvea* (wadslakje)



Figuur 2.20 Biomassa per jaar van *Hydrobia ulvea* (wadslakje).

De biomassa van *Hydrobia ulvea* (wadslakje) neemt in de loop der jaren af.

- Dominante soorten

- De soorten die het meest voorkomen op >6 m verschillen tussen oost & west. In beide deelgebieden komen wel vooral Polychaeten en Oligochaeta voor. Opvallend is dat 'Nothing found' (plaatsen waar geen organismen worden waargenomen) ook vaak voorkomt in het oosten op >6m diepte.
- De soorten die het meest voorkomen op 2-6 m verschillen tussen oost & west, maar behoren wel grotendeels tot dezelfde klasse. In beide deelgebieden komen wel vooral Polychaeten en Oligochaeta voor.
- De soorten die het meest voorkomen op 0-2 m verschillen tussen oost & west. In beide deelgebieden komen wel vooral Polychaeten en Oligochaeta voor.
- Van de hoeveelheid soorten op 0-2 m is het aandeel Polychaeten groter dan in de andere diepteklassen. Kijkend naar de verschillen tussen de diepteklassen valt het op dat er overal vooral Oligochaeten en Polychaeten voorkomen. Vooral op 0-2 m bestaat een groot deel van de 10 meest voorkomende soorten qua aantallen uit deze groepen.
- Biomassa (mg/m<sup>2</sup>)
  - In beide deelgebieden en op alle dieptes wordt de biomassa met name bepaald door Gastropoda, Bivalvia en Ascidiacea. Ditzelfde resultaat wordt bereikt als gekeken wordt naar AFDW (Ash Free Dry Weight).
- Dichtheid
  - In beide deelgebieden komen Polychaeta in hoge dichtheden voor. In de ondiepere delen (0-2 m) neemt het aandeel soorten dat tot de Polychaeten behoort wel toe.

### 2.5.2 Wat kan worden geconcludeerd uit trends in de benthische fauna?

The utility of the benthic infauna database appears to be limited by the sampling method used. Apparently three 80 mm cores were subsampled for sediments and infauna from each box core at each site. This may be a case of pseudoreplication (Hurlburt 1984). If so, then the presently available data likely violates assumptions of statistical tests that are needed to form the basis for solid conclusions.

Nonetheless, a general descriptive summary of the data suggests the following. There is little if any significant difference in the abundance or biomass of infauna with depth or season (Spring vs. Fall) (Fig. 2.9, 2.10). There is considerable variation over time in the abundance of oligochaetes, and in the abundance and biomass of bivalves. There is a trend of declining numbers of *Mysella bidentata*, particularly in the Westelijk deel over several years (Fig. 2.14, 2.15). A similar trend exists in abundance of the polychaete *Nereis virens* throughout Grevelingenmeer, which dominates biomass; however, there is no apparent trend for other species of *Nereis*, or other polychaetes. The biomass of the polychaete *Lanice conchilega* increased rapidly from 2007 to 2008, while biomass remained low and fairly constant for other polychaetes since 1990. In contrast, biomass of the snail *Hydrobia* has declined fairly consistently since 1990. There was a strong decline in the biomass of the clam *Ceratostoma edule* from 1993-2007, following a period of population growth from 1990-1993. The biomass of all bivalves has declined from 1998-2007.

In terms of the abundance of all benthic infaunal organisms combined, there were no perceptible trends over time from 1990-2008, and slightly lower average numbers in Fall than Spring. Likewise, there were no apparent trends in assemblage abundance with depth, or between east and west areas. In terms of total assemblage biomass (AFDW), between 0-2 M there was on average a decline between 1990-2008, and few if any seasonal differences in these shallow depths. This contrasts with biomass between 2-6 M, 6-45 M, and 0-45 M,

where there were no clear trends overall, but somewhat lower biomass in recent years at 6-45 M. Diversity was at high levels more or less typical for unimpacted habitats of this type. Taxa present include: oligochaetes, polychaetes, bivalves, snails, amphipods, crabs, sea anemones, sponges, and tunicates.

#### What can be concluded from trends in the benthic infauna database in combination with other data sets?

In the present study, variation in the benthic data cannot be adequately or fully explained using the available abiotic information. This may partly be a consequence of inaccuracies in the data, and a sampling design that does not appear to have been optimized for this particular research question. For example sediment and infaunal sampling appears to have been pseudoreplicated (Hurlburt 1984) and not done synoptically with collection of other datasets. Abiotic data sets in combination with benthic data from one or more time periods can sometimes be used together, if it can be assured that there are valid linkages between datasets, and that, e.g., there are no critical inconsistencies, missing values, or major outliers. In this instance, we cannot assure direct comparability of datasets, or validate the assumptions required for statistical analyses; as in previous studies, this is not unexpected given that various datasets were collected at different times or sites. Moreover, it is not unusual that there can be strong dependence among various physical and biotic parameters, e.g., oxygen concentration and BOD. In such cases, the assumption of independence of data required for a number of statistical analyses cannot be validated.

In this case, as in others, variation in benthic assemblage parameters is likely most explained by variation between sites and interaction between sites and years (e.g., Ysebaert et al. 2009). This implies that local environmental differences account for the most variance in datasets.

However, it is also likely that abiotic factors alone are not sufficient to provide accurate predictions regarding patterns or trends in benthic species assemblages. Nonetheless some general conclusions can be drawn. Data available suggest the combined high importance of hydrodynamics – current velocities, tidal influences, and bathymetry (depth), which have been shown to be structuring parameters for subtidal benthic assemblages (Planke et al. 2009, Ysebaert et al. 2009, Bureau Waardenburg 2010, van Wesenbeek et al. 2010). Other potentially important factors, including sediment composition and depth are correlated with water movement dynamics. Potentially similar patterns in benthic species biomass and density may occur in Grevelingenmeer (BIOMON datasets for Grevelingenmeer) and in the Westerschelde (van Wesenbeek et al. 2010). The predictability of benthic species composition can possibly be enhanced if certain biotic parameters are taken into account, such as food availability (Chlorophyll-a concentration, or primary production data, BOD, biomass). Consideration of such an integrated biological, chemical and physical sampling approach may deserve some attention in the future.

The effects of reduced tidal flow on water column chemistry, physics, and likely biological oceanographic changes are well documented, as are the conditions for the appearance and growth of *Beggiatoa* populations and mat formation (Bureau Waardenburg 2010, Lengkeek and Bouma 2010, Deltares 2011). The seasonal or otherwise intermittent reductions in oxygen concentration near the sediment water interface can be further reduced via oxygen consumption of *Beggiatoa*. This along with sulfide generation by the bacterial mats creates hypoxic or anoxic conditions unsuitable for recruitment, growth and survival of benthic infauna. Importantly however, mat presence alone is not a prerequisite for disturbance or

damage to benthic assemblages, which occurs where mats are small or absent (Bureau Waardenburg 2010, this study). Rather, low oxygen levels at or near the sediment-water interface appear to be the primary factor leading to disturbance of the benthic assemblage. What might be strongly inferred (*sensu* Wenner 2003) from data presently available is that there appears to be some relationship between oceanographic conditions and bacterial mat cover, and, in turn, with benthic condition. However, these relationships are not consistent, causal or conclusive. There is a well-documented relationship between seawater temperature and dissolved concentrations of N-nutrients, and with oxygen levels in coastal waters, through primary production and solubility processes, respectively (Jackson 1977; Gustafsson & Nordberg, 1999). These relationships, along with bathymetry, tidally driven flow, and seasonal variance in biogeochemical oceanographic parameters associated with the development, strength and persistence of thermoclines may very well explain spatio-temporal patterns in temperature, dissolved oxygen and nutrients near or at the water column-benthic ecotone. Data show that at 120 sites, there is no visible damage to the benthic assemblage and 0 % cover of bacteria mat. In all other cases, there were 21 or fewer sites where there was no consistent relationship between mat cover and benthic condition. There was visible damage to the benthic assemblage regardless of the extent of benthic cover by bacterial mats (0 to > 50% mat cover,  $n < 20$  sites). Similarly, there was no consistent relationship between the number of sites where all benthic infauna were dead and the degree of benthic cover of *Beggiatoa* mats (0 to > 50% mat cover,  $n < 21$  sites). In summary, the presence or size of bacterial mats cannot be reliably used to predict the present or future condition of benthic assemblages. However, presence of bacterial mats is indicative of reduced oxygen levels, and possibly enhanced nutrient levels. It is not clear if this is due to changes in decomposition of organic material within the system (autochthonous input) or possible anthropogenic pollution from an (unapparent) outside source(s) (allochthonous input), other changes in pelagic-benthic coupling of unknown cause, or some combination of these.



### 3 Hypothese voor geobserveerde ontwikkeling van het bodemleven

De belangrijkste ontwikkelingen die de afgelopen jaren in het bentische ecosysteem het Grevelingenmeer zijn geobserveerd, zijn een groter areaal bedekt met bacteriële matten en vermindering of zelfs afwezigheid van overig bodemleven.

Op basis van de gepresenteerde gegevens wordt de volgende effectketen vermoed, die de geobserveerde ontwikkeling van het leven in en op de bodem van het Grevelingenmeer kan verklaren:

- a. Een locatie met een gezond bodemleven krijgt te maken met zuurstofarme of zelfs zuurstofloze condities, waardoor het bodemleven afsterft.
- b. De zuurstofarme condities zijn het gevolg van de stratificatie die kenmerkend is voor de huidige toestand en het huidige (water)beheer van het Grevelingenmeer. In een diep meer met weinig dynamiek ontstaat hoe dan ook stratificatie, waarbij temperatuurstratificatie en zoutstratificatie samenspelen. Deltares (2010) heeft bijvoorbeeld laten zien dat een 'toevallige' zoutstratificatie in begin april 2008, de aanzet geeft tot een relatief sterke temperatuurstratificatie. De combinatie van zout- en temperatuurstratificatie zorgt er vervolgens voor dat diepere delen van het meer gedurende maanden zuurstofarm blijven.
- c. Als de zuurstofconcentratie weer toeneemt – door verticale menging of door doorspoeling met zuurstofrijker water – ontwikkelen de *Beggiatoa* bacteriën zich als eerste. De bodem is nog zuurstofloos en sulfiderijk, terwijl de waterkolom zuurstof bevat. *Beggiatoa* kan deze locaties snel koloniseren.
- d. Kolonisatie door andere organismen volgt langzaam. Het onderzoek van Bureau Waardenburg heeft dat duidelijk aangetoond in hun vergelijking van aug/sept 2010 en maart 2011. Mogelijk wordt kolonisatie vertraagd door de aanwezigheid van *Beggiatoa*, maar dat is niet duidelijk. Daarvoor zijn te weinig gegevens beschikbaar.
- e. Door de afwezigheid van bodemdieren wordt de bodem niet omgewoeld (dat wil zeggen er is geen bioturbatie). Dit betekent dat zuurstof uit de waterkolom – als het weer aanwezig – alleen door diffusie de bodem indringt. Dit is een zeer traag proces. Omdat afbraak van organisch materiaal in de bodem wel doorgaat, zal daar juist sulfide door sulfaatreductie gevormd worden. De aanwezigheid van *Beggiatoa* op het grensvlak sulfide-zuurstof lijkt in zekere mate zelfversterkend, juist door de afwezigheid van omwoelende bodemdieren.
- f. Bureau Waardenburg (2010) constateert dat zich na enkele (winter)maanden nog geen gezond bodemleven heeft hersteld. Voordat het bodemleven zich volledig heeft kunnen herstellen vindt er weer een zuurstofarme periode plaats, die het bodemleven andermaal terugzet of doet afsterven. Kortom, door de steeds terugkerende zuurstofarme perioden krijgt het bodemleven niet de kans zich te herstellen.

Als deze effectketen juist is, dan is herintroductie van het getij dat ervoor zorgt dat de zuurstofarme periodes in de waterkolom minimaliseren, een effectieve maatregel voor het herstel van een gezond bodemleven. Het bodemleven krijgt dan kans om de getroffen gebieden weer te koloniseren en zich weer te ontwikkelen naar een gezonde situatie. Het herstel kan enkele jaren duren (Steckbauer et al., 2011). De snelheid waarmee goede bentische omstandigheden zich weer ontwikkelen, versterkt zichzelf door rekolonisatie en door bioturbatie en omwoeling door bodemdieren in en op het sediment. Herstel van het bodemleven zonder herstel van zuurstofrijke voorwaarden is onwaarschijnlijk.

Ondanks het bij elkaar brengen van verschillende datasets in dit rapport is het niet mogelijk om onomstotelijk kwantitatief vast te stellen of er een directe relatie bestaat tussen de zuurstofconcentratie en matvorming en/of de toestand van het bodemleven. Dit komt vooral doordat de verschillende datasets niet met deze onderzoeksvraag als doel zijn genomen, waardoor verschillen bemonsteringsdatum en -locatie een directe vergelijking en statische analyse bemoeilijken. Alle bekende en gecombineerde informatie maakt de relatie tussen de zuurstofconcentratie en matvorming en/of de toestand van het bodemleven wel zeer waarschijnlijk.

#### *Ophoping van organisch materiaal en zuurstofvraag*

De gestelde hypothese dat ophoping van organisch materiaal ten grondslag ligt aan het voorkomen van *Beggiatoa* is gefalsificeerd of ten minste onwaarschijnlijk. Metingen van het percentage organisch materiaal in de bodem laten tussen 2000 en 2007 geen ophoping zien. (Van 1999 naar 2000 is in de diepe monsters een nog niet verklaarde sprong zichtbaar.) Bovendien is het percentage gemiddeld minder dan 1%, behalve in de diepe delen waar het in het oosten tot circa 2% oploopt. Dit zijn gebruikelijke percentages voor kustwateren. Ophoping van organisch materiaal zou voor het Grevelingenmeer ook onverwacht zijn, omdat het Grevelingenmeer het minst belaste watersysteem in de zuidwestelijke delta is (in termen van g-N/m<sup>2</sup>/jaar). Er is geen reden waarom juist hier een groter deel van het organisch materiaal in de bodem opgeslagen zou worden. Tenslotte houdt ophoping juist in dat er geen zuurstofvraag wordt uitgeoefend, want pas bij afbraak (dus het tegenovergestelde van ophoping) wordt de zuurstofvraag geëffectueerd al dan niet indirect via de vorming van sulfides.

*Beggiatoa* is zelf geen oorzaak van de zuurstofarme condities. Het zuurstofverbruik van *Beggiatoa* draagt wel bij aan een verdere verlaging van de zuurstofconcentratie bij de bodem. Hoewel *Beggiatoa* zuurstof verbruikt in zijn metabolisme, moet bedacht worden dat toch ook hier organisch materiaal aan de basis ligt, omdat bij de reductie van sulfaat naar sulfide organisch materiaal wordt verbruikt. Feitelijk vormt sulfide een tussenschakel waardoor de *Beggiatoa* via een tussenstap voor het zuurstofverbruik zorgt. Zonder deze tussenstap zou organisch materiaal rechtstreeks met zuurstof reageren. Kortom, de zuurstofvraag is veel meer gerelateerd aan de hoeveelheid en de afbreekbaarheid van organisch materiaal dan aan de wijze waarop de zuurstofvraag tot stand komt.

#### *Indicator voor de toestand van het bodemleven*

De instantane zuurstofconcentratie is geen maat voor de status van de bodem en het bodemleven. De situatie is juist omgekeerd. De status van de bodem is een maat voor de historie van de zuurstofconcentratie in de waterkolom van de afgelopen weken of zelfs maanden. De 'schade van het bodemleven' is daarbij een betere indicator dan de aanwezigheid van *Beggiatoa*, zoals Bureau Waardenburg (2010) terecht concludeert.

#### *Hypothesetoetsing*

De hypothese kan nader getoetst worden door in het veld een situatie te creëren waarbij op een getroffen plek continu zuurstof in de waterkolom aanwezig te hebben. Dit zou bijvoorbeeld door beluchting gegarandeerd kunnen worden. Ook een translocatie, dat wil zeggen verplaatsing van een geschikt sedimentpakket naar een ondiepe, zuurstofrijke locatie, zou wellicht in aanmerking komen, al is de kans op verstoring en ongewenste beïnvloeding groter.

Een tweede voorwaarde is dat bodemdieren deze locatie kunnen bereiken. Als de zuurstofconcentratie bij de waterbodem zodoende continu hoog genoeg zal zijn, ontwikkelt



zich binnen enkele jaren ter plekke weer een gezonde levensgemeenschap, wat de hypothese bevestigt.

Bij de veldproef moet een geïntegreerd monitoringprogramma worden uitgevoerd. Dat wil zeggen dat coördinatie van bemonsteringslocaties en van timing plaats moet vinden, zodat de gemeten parameters statistisch met elkaar in verband gebracht kunnen worden. Vervolgens kunnen (voorspellende en verklarende) modellen worden opgezet of aangepast. Mogelijk biedt de proef rondom het Tidal Test Centre gelegenheid voor een dergelijke veldproef en monitoringprogramma.

Aanvullende proeven in een gecontroleerde laboratoriumomgeving kunnen uitgevoerd worden om het bereik van de zuurstoftolerantie voor *Beggiatoa* vaststellen.



## 4 Referenties

- Bernhard, J.M., Buck, K.R., Farmer, M.A. & Bowser, S.S. (2000). The Santa Barbara Basin is a symbiosis oasis. *Nature*, 403, 77-80.
- Bureau Waardenburg (2010): De verspreiding van witte bacteriematten en schade aan het bodemleven in het Grevelingenmeer - Onderzoek naar de effecten van zuurstofloosheid; W. Lengkeek, S. Bouma en B. van den Boogaard; in opdracht van Deltares, rapport nr. 10-187, 29 november 2010.
- Bureau Waardenburg (2011): De verspreiding van witte bacteriematten en schade aan het bodemleven in het Grevelingenmeer II (concept) – Metingen van de nazomer 2010 en het eind van de winter 2011; dr. W. Lengkeek en Drs. S. Bouma, in opdracht van Natuur- en Recreatieschap de Grevelingen, rapport nr. 11-101, 22 juni 2011.
- Davies, I.M., Smith, P., Nickell, T.D. & Provost, P.G., (1996). Interactions of salmon farming and benthic microbiology in sea lochs. In *Aquaculture and sea lochs* (ed. K.D. Black), pp. 33-39., Oban: Scottish Association for Marine Science
- Deltares (2008): Verkenning oplossingsrichtingen voor een betere waterkwaliteit en ecologische toestand van het Grevelingenmeer; verkenning Grevelingen, water en getij; Arno Nolte, Tineke Troost, Gerben de Boer, Claudette Spiteri en Bregje van Wesenbeeck; Rapport Z4576 in opdracht van Rijkswaterstaat Waterdienst.
- Deltares (2010): 3D model van het Grevelingenmeer voor hydrodynamica, waterkwaliteit en primaire productie – Kalibratie- en validatiedocument; C. Spiteri en A.J. Nolte; Rapport 1201650 in opdracht van Natuur- en Recreatieschap de Grevelingen; December 2010.
- Deltares (2010a): Using habitat classification systems to assess impacts on ecosystems. Validation of the ZES.1 for the Westerschelde; B. van Wesenbeeck, H. Holzhauer, en T. Troost; Deltares Rapport. 45 p.
- Deltares (2011): Effect van herintroductie van getij op waterkwaliteit en ecologische toestand van het Grevelingenmeer – Scenarioberekeningen ten behoeve van de MIRT-Verkenning; drs. A.J. Nolte en C. Spiteri Ph.D, Rapport 1201650-000, juni 2011.
- Diaz, R.J. & Rosenberg, R. (1995). Marine benthic hypoxia: a review of its ecological effects and the behavioural responses of benthic macrofauna. *Oceanography and Marine Biology: an Annual Review*, 33, 245-303.
- Fenchel, T. and C. Bernard (1995): Mats of colourless sulfur bacteria. I. Major microbial processes. *Marine Ecology Progress Series* 128: 161-170.
- Fenchel, T. and C. Bernard (1995): Mats of colourless sulfur bacteria. II. Structure, composition of biota and successional patterns. *Marine Ecology Progress Series* 128: 171-179.
- Gustafsson, M. & Nordberg, K. (1999). Benthic foraminifera and their response to hydrography, periodic hypoxic conditions and primary production in the Koljo fjord on the Swedish west coast. *Journal of Sea Research*, 41, 163-178.
- Hagen, K.D. & Nelson, D.C., (1997). Use of reduced sulfur compounds by *Beggiatoa* spp.: enzymology and physiology of marine and freshwater strains in homogeneous and gradient cultures. *Applied and Environmental Microbiology*, 63, 3957-3964.
- Hansell, D. A. and Carlson, C. A. (eds.). (2002). *Biogeochemistry of Marine Dissolved Organic Matter*. Academic Press, San Diego, CA. 744 p.
- Hill, J.M. (2008). *Beggiatoa* spp. on anoxic sublittoral mud. Marine Life Information Network: Biology and Sensitivity Key Information Sub-programme [on-line]. Plymouth: Marine

- Biological Association of the United Kingdom. [cited 06/12/2011]. Available from: <<http://www.marlin.ac.uk/habitat/ecology.php?habitatid=181&code=1997>>
- Hiscock, K., Southward, A., Tittley, I., Jory, A. & Hawkins, S. (2001). The impact of climate change on subtidal and intertidal benthic species in Scotland. Scottish National Heritage Research, Survey and Monitoring Report , no. 182., Edinburgh: Scottish National Heritage
- Van Hoey, G., Drent J., Ysebaert ,T., and P. Herman. (2007).The Benthic Ecosystem Quality Index (BEQI), intercalibration and assessment of Dutch coastal and transitional waters for the Water Framework Directive. FINAL REPORT. 244 p.
- Hurlbert, S H. (1984).Pseudoreplication and the design of ecological field experiments. *Ecol Monogr.* 54:187-211,
- Jackson, G.A. (1977). Nutrient and production of giant kelp, *Macrocystis pyrifera*, off Southern California. *Limnology and Oceanography* 22 (1977), pp. 979–995
- Musmann, M., H. N. Schulz, et al. (2003): "Phylogeny and distribution of nitrate-storing *Beggiatoa* spp. In coastal marine sediments." *Environmental Microbiology* 5(6): 523-533.  
[microbewiki.kenyon.edu/index.php/Beggiatoa#Ecology](http://microbewiki.kenyon.edu/index.php/Beggiatoa#Ecology)
- Plancke, Y., Vos, G., Demulder, T. and F. Mostaert. (2009). Habitat mapping Westerschelde - Deelrapport 1: Classificatie op basis van bodemvormen en hydrodynamica. WL Rapporten, Mod 754-06. Waterbouwkundig Laboratorium. Antwerpen. België.
- Rijkswaterstaat (2011): Grevelingenmeer: meer kwetsbaar? – Een beschrijving van de ecologische ontwikkelingen voor de periode 1999 t/m 2008-2010 in vergelijking met de periode 1990 t/m 1998; L.P.M.J. Wetsteijn, Rijkswaterstaat Waterdienst, 7 januari 2011.
- Schmidt-Nielsen, K. (1984). 1984 Scaling: Why is Animal Size so Important? Cambridge & New York: Cambridge University Press. 241 p.
- Spies, R.B. & Davis, P. (1979). The infaunal benthos of a natural oil seep in the Santa Barbara Channel. *Marine Biology*, 50, 227-237.
- Steckbauer, A., Duarte, C.M., Carstensen, J., Vaquer-Sunyer, R., and D.J. Conley. (2011). Ecosystem impacts of hypoxia: thresholds of hypoxia and pathways to recovery. *Environ. Res. Lett.* 6 025003 doi:10.1088/1748-9326/6/2/025003.
- Van Hoey, G., Drent, J., Ysebaert, T., Herman, P. (2007). The Benthic Ecosystem Quality index (BEQI), intercalibration and assessment of Dutch Coastal and Transitional Waters for the Water Framework Directive. NIOO rapport 2007-02
- Vogel, S. (1988). *Life's Devices: The Physical World of Animals and Plants*. Princeton University Press.369 p.
- Wenner, A.M. (2003). The elusive honey bee “language” hypothesis. *Journal of Insect Behavior*. 15: 839-858.
- Williams, T.M & Unz, R.F. (1989). The nutrition of *Thiothrix*, Type 021N, *Beggiatoa* and *Leucothrix* strains. *Water Research*, 23: 15-22.
- Ysebaert & Herman (2002):
- Ysebaert, T., Plancke, Y., Bolle L., De Mesel, I., Vos, G., Wielemaker, A., van der Wal, D. & Herman, P.M.J. (2009). Habitat mapping Westerschelde - Deelrapport 2: Ecologie en ecotopen in het subtidaal van de Westerschelde. Nederlands Instituut voor Ecologie (NIOO-KNAW). Centrum voor Estuariene en Mariene Ecologie, Yerseke.

## A GTSO transectiemetingen

Reproductie van paragraaf 7.1.2 van:

Rijkswaterstaat (2011): Grevelingenmeer: meer kwetsbaar? – Een beschrijving van de ecologische ontwikkelingen voor de periode 1999 t/m 2008-2010 in vergelijking met de periode 1990 t/m 1998; L.P.M.J. Wetsteijn, Rijkswaterstaat Waterdienst, 7 januari 2011.